

Max-Planck-Institut für Astronomie Heidelberg-Königstuhl



Jahresbericht

2007



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Zum Titelbild:

Der Krebsnebel Messier 1 steht 6300 Lichtjahre von uns entfernt im Sternbild Stier. Er ist der noch heute schnell expandierende Überrest der Supernova-Explosion eines Sterns mit etwa zehnfacher Sonnenmasse. Die Explosion selbst wurde im Jahr 1054 von chinesischen Astronomen beobachtet und dokumentiert.

Das Bild ist ein Dreifarben-Komposit aus Aufnahmen, die mit der blauempfindlichen Large Binocular Camera im Primärfokus des linken 8.4-Meter-Spiegels des LBT entstanden. Der gezeigte Ausschnitt ist 24.5 Bogenminuten breit.

Bild: Vincenzo Testa, LBTO

Max-Planck-Institut für Astronomie

Heidelberg-Königstuhl

Jahresbericht

2007



Max-Planck-Institut für Astronomie

Wissenschaftliche Mitglieder, Kollegium, Direktoren:

Prof. Hans-Walter Rix (Geschäftsführender Direktor)
Prof. Thomas Henning

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

Emeritierte wissenschaftliche Mitglieder:

Prof. Guido Münch

Auswärtige wissenschaftliche Mitglieder:

Prof. Immo Appenzeller, Heidelberg
Prof. Steven Beckwith, Baltimore
Prof. Willi Benz, Bern

Prof. Karl-Heinz Böhm, Seattle
Prof. George H. Herbig, Honolulu
Prof. Rafael Rebolo, Tenerife

Fachbeirat:

Prof. Robert Williams, Baltimore (Vorsitz)
Prof. Ralf-Jürgen Dettmar, Bochum
Prof. Ewine van Dishoek, Leiden
Prof. Pierre Léna, Meudon
Prof. Rolf-Peter Kudritzki, Honolulu

Prof. Dieter Reimers, Hamburg
Prof. Anneila Sargent, Pasadena
Prof. Rens Waters, Amsterdam
Prof. Lodewijk Woltjer, St-Michel-l'Obs.
Prof. Harold Yorke, Pasadena

Kuratorium:

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

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

Mitarbeiter:

Gegenwärtig sind 253 Mitarbeiter (einschließlich der Drittmittelbeschäftigten) am Institut tätig, darunter 131 Wissenschaftler, davon 56 Nachwuchswissenschaftler und 50 Doktoranden.

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
Telefon: 0034 950 230 988, 0034 950 632 500 *Fax:* 0034 950 632 504
E-mail: info@caha.es *Internet:* <http://www.caha.es>

Arbeitsgruppe »Laboratorastrophysik«, Jena

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

© 2008 Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg

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

Text: Thomas Bürhrke und andere

Bilder: MPIA und andere

Graphik Bildbearbeitung und 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. Instrumente und Projekte	96
I. Allgemeines	6	IV.1 Instrumente für das LBT	96
I.1 Wissenschaftliche Zielsetzung	6	LUCIFER 1 und 2	96
I.2 Observatorien – Teleskope – Instrumente	10	LINC-NIRVANA	103
I.3 Nationale und Internationale Zusammenarbeit ..	17	Charakterisierung des LBT	105
I.4 Lehre und Öffentlichkeitsarbeit	20	IV.2 Instrumente für das VLT	109
II. Highlights	21	Katzenaugen für PRIMA	109
II.1 Jüngster extrasolarer Planet in zirkumstellarer		SPHERE	113
Scheibe entdeckt!	21	MATISSE und GRAVITY für das VLTI	114
II.2 Eine Suche nach Exoplaneten bei 54 nahen		IV.3 Instrumente für den Calar Alto	116
Sternen	25	PANIC	116
II.3 Die schnelle Entstehung von Planetesimalen		Die neue Steuerung des 3.5-m-Teleskops.....	117
in turbulenten Scheiben	30	IV.4 LAIWO, der Large Imager für das Wise	
II.4 Erstes kalibriertes Spektrum eines		Observatory	118
extrasolaren Planeten	35	IV.5 Instrumente für Weltraumobservatorien	120
II.5 Zwerggalaxien unter der Lupe		PACS für HERSCHEL	120
– Erste Ergebnisse vom LBT	40	MIRI und NIRSPEC für das JWST.....	121
II.6 Aktivität Schwarzer Löcher in fernen		V. Menschen und Ereignisse	123
Quasaren	45	V.1 Tagungen, Vorträge, Führungen und mehr	123
II.7 Zwerggalaxien – die fehlenden Satelliten		V.2 Die »Nacht der Wissenschaft«	125
der Milchstraße	50	V.3 THISBES letzte Reise	127
II.8 Einzigartige Galaxienportraits mit THINGS	57	V.4 Ehrungen, Preise und eine Berufung	129
III. Ausgewählte Forschungsgebiete	66	V.5 Ein Gespräch mit Willy Benz	135
III.1 Gas und Staub in nahen Galaxien	66	V.6 Ein Gespräch mit Ranga Yogeshwar	138
III.2 In welchen Galaxien leben Quasare?	74	Personal	142
III.3 Chemie in protoplanetaren Scheiben	82	Arbeitsgruppen	144
III.4 Starburst-Sternhaufen in der Milchstraße	92	Lehrveranstaltungen	146
		Mitarbeit in Gremien	146
		Weitere Aktivitäten am Institut	147
		Preise	148
		Vereinbarkeit von Wissenschaft, Beruf und Familie..	148
		Zusammenarbeit mit Firmen	148
		Tagungen, Vorträge	151
		Veröffentlichungen	157

Vorwort

In diesem Jahresbericht werden die wissenschaftlichen Aktivitäten des Heidelberger Max-Planck-Instituts für Astronomie (MPIA) beschrieben. Er richtet sich sowohl an unsere Kollegen weltweit, als auch an das interessierte Publikum.

Das Jahr 2007 hat auf Gebieten, die von der Struktur des Milchstraßensystems bis zu den Exoplaneten reichen, eine Fülle wissenschaftlicher Ergebnisse gebracht.

Es gab auch stetige Fortschritte in der Entwicklung zukunftsweisender neuer Einrichtungen und Instrumente. Mit den Arbeiten am LBT, einschließlich seiner ersten binokularen Beobachtungen, an den VLTI-Instrumenten der zweiten Generation und an der Instrumentierung des JWST wurden Grundlagen für zukünftige astronomische Entdeckungen geschaffen.

Zusätzlich zu den kurzen Darstellungen einer Vielfalt laufender wissenschaftlicher Ergebnisse berichten wir ausführlicher über wenige, ausgewählte Forschungsfelder am Institut.

Wir hoffen, den Lesern dieses Jahresberichts ein Bild von der Forschung und der Arbeit am MPIA zu vermitteln.

Hans-Walter Rix, Thomas Henning

Heidelberg, im August 2008

I. Allgemeines

I.1 Wissenschaftliche Zielsetzung

Die Arbeit des Max-Planck-Instituts für Astronomie (Abb. I.1) dient dem Ziel, die Natur und Entwicklung der Planeten, Sterne, Galaxien und des Universums als Ganzes zu erforschen und zu verstehen. Dieses Ziel verfolgen wir mit der Entwicklung und dem Einsatz von Teleskopen und Messinstrumenten, mit der Planung und Ausführung vielfältiger Beobachtungsprogramme, sowie mit der physikalischen Analyse und theoretischen Modellierung der beobachteten Phänomene. Das MPIA konzentriert seine Beobachtungen auf den optischen und infraroten Spektralbereich und ist führend in der instrumentellen Entwicklung sowohl für bodengebundene als auch für weltraumgestützte Observatorien.

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

Die Forschung am Institut ist in zwei wissenschaftlichen Abteilungen organisiert: Galaxien und Kosmologie, sowie Planeten- und Sternentstehung. Zusätzlich zu den fest angestellten Mitarbeitern in diesen Abteilungen bestehen auch sieben selbstständige Nachwuchsgruppen (vier von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierte Emmy-Noether-Gruppen und drei Nachwuchsgruppen der Max-Planck-Gesellschaft), 56 Post-Docs und 50 Doktoranden waren im Berichtsjahr am Institut tätig. Es besteht auch eine enge Zusammenarbeit in Forschung und Lehre mit dem neuen Zentrum für Astronomie an der Universität Heidelberg (ZAH), zum Beispiel im Rahmen der International Max Planck Research School (IMPRS) for Astronomy and Cosmic Physics.

Die Hauptarbeitsgebiete beider Abteilungen haben zahlreiche wissenschaftliche und praktische Aspekte gemeinsam. Offensichtlich ist die Sternentstehung mit der



Entstehung und Entwicklung der Galaxien eng verknüpft. Aber auch die Anforderungen an die Messinstrumente sind in beiden Abteilungen sehr ähnlich, etwa in Bezug auf die benötigte hohe räumliche Auflösung oder auf den hohen Stellenwert umfassender Durchmusterungen und der Beobachtungsmöglichkeiten im infraroten Spektralbereich.

Galaxien und Kosmologie

Das »Reich der Galaxien«

Wir wissen, dass das Universum gleich 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«) bis herab zu den Galaxien, den Sternhaufen, den Sternen und deren Planeten.

Die Bildung dieser reichhaltigen Strukturen lässt sich allerdings nur 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, stellen in dieser hierarchischen Ordnung eine mittlere Ebene dar und bestehen aus Millionen bis 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 ihrer »Morphologie« (ihrem Erscheinungsbild) und in ihrer Struktur bei Weitem nicht die Vielfalt, die zunächst physikalisch möglich erscheint. Einerseits scheint die Vielfalt der Galaxien groß zu sein: Als Objektklasse umspannen sie 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. Andererseits 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 miteinander: 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 Fragen würden wir gerne beantworten?

Viele der Projekte, die die Forscher des MPIA verfolgen, befassen sich letztlich damit, welche dieser drei Mechanismen wann und wo eine Rolle spielen.

Einige der spezifischen Fragen, die von den Forschern dieser Abteilung verfolgt werden, sind:

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

Was unternehmen wir, um die Antworten zu finden?

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 Durchmus-

terungsteleskope – 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 in allen Spektralbereichen, vom Radio- bis hin zum Röntgenbereich, erforderlich.

Das MPIA war ein bedeutender Partner bei mehreren Durchmusterungen, die einen Durchbruch versprechen oder dies bereits geleistet haben: der Sloan Digital Sky Survey (SDSS) zur Untersuchung des Milchstraßensystems und der Lokalen Gruppe, sowie dessen Nachfolgeprojekt PanSTARRS 1 ab dem Jahre 2008, ergänzt durch die im Berichtsjahr in Betrieb genommenen LBC-Kameras am LBT; das 2.2-m-Teleskop auf La Silla machte die Durchmusterung COMBO-17 zur Entwicklung von Galaxien möglich; die Instrumente IRAC und MIPS am Weltraumteleskop SPITZER; und (ab dem Start im Jahr 2009) das Instrument PACS der HERSCHEL-Mission für Untersuchungen zur Sternentstehung und des Interstellaren Mediums, ergänzt durch das VLA, das Interferometer auf dem Plateau de Bure, APEX und bald auch ALMA im Radio- und Submillimeterwellen-Bereich. Die Abteilung »Galaxien und Kosmologie« betreibt wahrlich Astrophysik bei multiplen Wellenlängen.

Entstehung von Sternen und Planeten

Die Entstehung von Sternen ist ein fundamentaler Prozess im Universum. Sie bestimmt die Struktur und die 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 der vielfältigen 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 die Nutzung des Atacama Large Millimeter Array (ALMA) vor, das demnächst in Betrieb gehen wird.

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

Mit der Entdeckung der ersten extrasolaren Planeten im Jahre 1995 trat die Erforschung der Planetenentstehung in protoplanetaren Scheiben in eine neue Phase stürmischer Entwicklung ein. Die Abteilung ist gut ge-

rüstet, 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 IMAGER 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 je-

des andere Instrument dieser Art und bereitet den Weg für das Instrument PLANET FINDER der ESO.

Das theoretische Programm der Abteilung Planeten- und Sternentstehung ist konzentriert auf komplexe numerische Simulationen zur Entwicklung protoplanetarer Scheiben, einschließlich des Zusammenspiels von Strahlung, Dynamik, Chemie und Entwicklung der Staubteilchen. Die Entstehung Brauner Zerge ist ein weiterer Gegenstand theoretischer Studien. Programme zur Berechnung des Strahlungstransports in mehreren Dimensionen, sowohl für Moleküllinien als auch für das Kontinuum der Staubemission, wurden in der Abteilung entwickelt. Die theoretischen Studien sind 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.

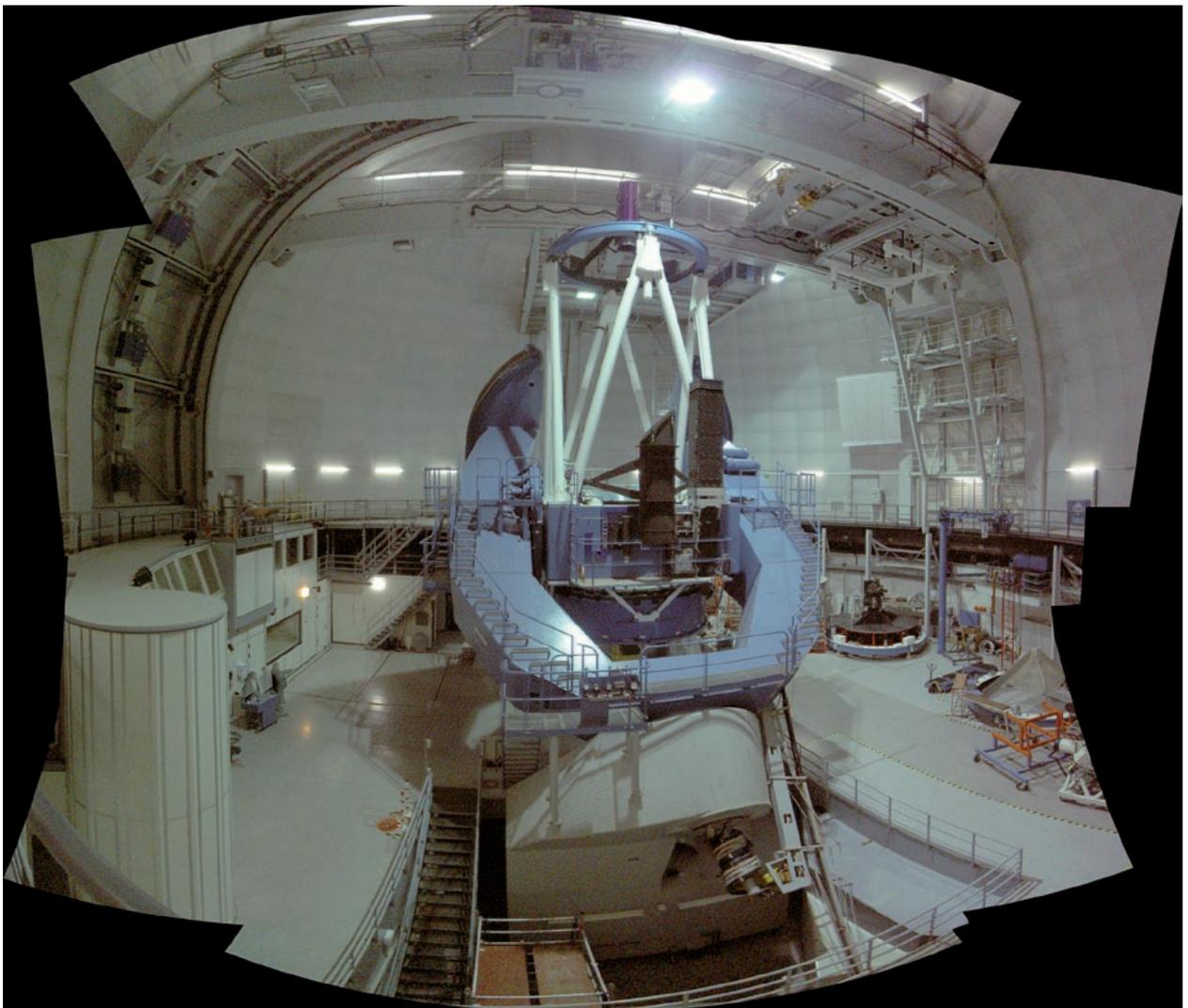
1.2 Observatorien – Teleskope – Instrumente

Das MPIA war 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) auf dem Mt. Graham in der Nähe von Tucson, Arizona; Ende 2007 wurde die zweite Primärfokus-Ka-

mera am Teleskop installiert und weitgehend in Betrieb genommen; sie konnte bereits für die ersten wissenschaftlichen Beobachtungsprogramme angeboten werden. Das Institut setzt auch sein 2.2-m-Teleskop ein, das auf dem Berg La Silla in Chile von der Europäischen Südsternwarte (Eso) betrieben wird, und an dem Wissenschaftler der Max-Planck-Gesellschaft 25 Prozent der Beobachtungszeit nutzen können.

Die am Institut entwickelten und gebauten Instrumente werden sowohl für erdgebundene als auch für weltraumgestützte Beobachtungen eingesetzt. Beide Beobachtungs-

Abb. 1.2: Das 3.5-m-Teleskop auf dem Calar Alto



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

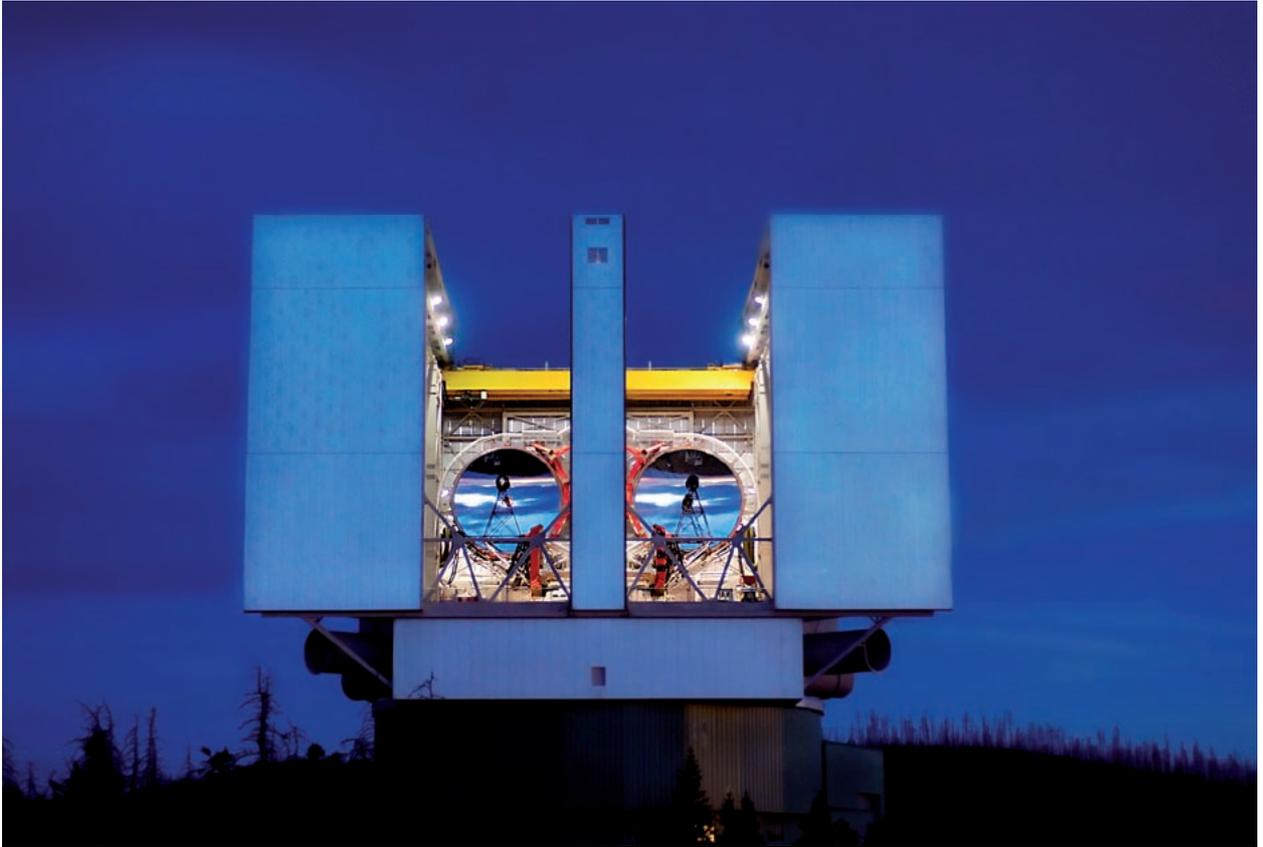
An der Entwicklung der Infrarotastronomie hat das MPIA seit deren Pionierzeit in den siebziger Jahren erfolgreich teilgenommen. So entstand ISOPHOT, eines von vier Messinstrumenten des weltweit ersten Infrarot-Weltraumobservatoriums ISO der Europäischen Weltraumbehörde ESA, unter der Federführung des 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 bei jetzt anlaufenden Projekten, wie den Weltraumteleskopen HERSCHEL und James Webb Space Telescope (JWST) ein.

Astronomen des MPIA sind gegenwärtig auch am US-amerikanischen Infrarotobservatorium SPITZER aktiv mit Beobachtungsprogrammen beteiligt.

Die Instrumente der neuen Generation für Teleskope der 8-m-Klasse und für Weltraumobservatorien sind zu komplex und zu teuer, als dass sie in einem einzelnen Institut von der Größe des MPIA entwickelt werden könnten. Deshalb ist das Institut heute an einer Reihe internationaler Kollaborationen zum Bau neuer Großteleskope und wissenschaftlicher Instrumente beteiligt. Damit ist der Zugang zu den bedeutendsten Observatorien der Erde gewährleistet. Auf der Südhalbkugel ist dies das Very Large Telescope (VLT) der Eso in Chile mit seinen vier 8.2-Meter-Teleskopen, die sich zu einer leistungsstarken interferometrischen Anordnung zusammenschließen lassen. Auf der Nordhalbkugel ist das MPIA am Large Binocular Telescope (LBT) in Arizona beteiligt. Dieses außergewöhnliche Teleskop verfügt über zwei 8.4-Meter-Spiegel auf einer gemeinsamen Montierung und ist damit das weltweit größte Einzelteleskop. Mit der Aufnahme des regulären wissenschaftlichen Betriebes der ersten und der Inbetriebnahme der zweiten Primärfokuskamera im Jahr 2007 ist das LBT zu einem produktiven Großteleskop ersten Ranges geworden. Im Jahr 2007 wurde die Beteiligung des Instituts an der PanSTARRS-1-Kollaboration (PS 1) intensiviert. Damit hat das MPIA uneingeschränkten Zugang zu den Daten, die mit einem 1.8-m-Weitfeld-Teleskop auf Haleakala, einem Vulkan

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





der Hawaii-Insel Maui, gesammelt werden. Die erste Gigapixel-Kamera für dieses Projekt wurde im August 2007 ans Teleskop gebracht.

Diese Kollaborationen versetzen das MPIA in die Lage, den Nord- und Südhimmel mit erstklassigen Großteleskopen zu erforschen. Gleichzeitig beteiligt sich das Institut aktiv an Studien zur Instrumentierung von Großteleskopen der nächsten Generation, den sogenannten Extremely Large Telescopes (ELTs).

Instrumente für bodengebundene Astronomie

Gegenwärtig konzentrieren sich die Projekte des MPIA im Bereich der Instrumentierung bodengebundener Teleskope auf Instrumente für das VLT-Interferometer (VLTI) der Eso, hochgenaue Abbildungssysteme für LBT und VLT, sowie Durchmusterungsinstrumente für den Calar Alto und auch für das Wise-Observatorium in Israel. Das MPIA ist auch an Studien für die zukünftige Instrumentierung des Europäischen ELT (E-ELT) beteiligt.

Instrumente für das VLTI

Gegenwärtig (August 2008) werden die differenziellen optischen Verzögerungsstrecken des Dual-feed-Systems **PRIMA** am VLTI auf dem Cerro Paranal in Chile installiert. Sie wurden vom MPIA zusammen mit dem Observatoire

Abb. 1.4: Das Large Binocular Telescope (LBT) auf dem Mount Graham in Arizona. (Bild: LBTO)

de Genève und der Landessternwarte Heidelberg gebaut. Im damit verbundenen Forschungsprojekt ESPRI sollen die Verzögerungsstrecken dazu dienen, den Winkelabstand der untersuchten Sterne von einem Referenzstern mit Mikrobogensekunden-Genauigkeit zu messen. Damit wird die dynamische Bestimmung der Massen extrasolarer Planeten aufgrund präziser astrometrischer Messungen der Reflexbewegungen ihrer Zentralsterne möglich.

Das MPIA beteiligt sich am Bau von **MATISSE** und **GRAVITY**, Instrumenten der zweiten Generation für das VLTI. **MATISSE** ist ein Nachfolger des am MPIA gebauten Instruments **MIDI**, das seit September 2003 mit großem Erfolg auf dem Paranal betrieben wird. Das **MATISSE**-Konsortium besteht aus neun vom Observatoire de la Côte d'Azur geführten Instituten. **MATISSE** wird im mittleren Infrarot arbeiten und das Licht aller vier 8.2-m-Teleskope des VLT zur Abbildung mit Winkelauflösung im Bereich von 10 bis 20 Millibogensekunden zusammenführen. Die wissenschaftlichen Anwendungen reichen von der Struktur aktiver Galaxienkerne (AGN) bis zur Entstehung von Planetensystemen und masse-reichen Sternen und zur Untersuchung zirkumstellarer Umgebungen.

GRAVITY ist der Nachfolger von **PRIMA**. Wie **MATISSE** wird das Instrument das Licht aller vier 8.2-m-Teleskope des VLT zusammenführen, allerdings im nahen Infrarot. Das **GRAVITY**-Konsortium wird vom MPI für Extraterrestrische Physik in Garching geleitet. Neben dem MPIA sind das Observatoire de Paris und die Universität Köln beteiligt. Unterstützt von einer hochleistungsfähigen adaptiven Optik, wird **GRAVITY** in einem zwei Bogensekunden großen Bildfeld Präzisionsastrometrie kleinster Winkel und die phasenreferenzierte Abbildung schwacher Lichtquellen ermöglichen. Damit können die Bewegungsabläufe innerhalb weniger Vielfacher des Ereignishorizonts um das Schwarze Loch im Galaktischen Zentrum untersucht und die Allgemeine Relativitätstheorie im Grenzfall starker Felder getestet werden. Andere Anwendungen betreffen den direkten Nachweis von Schwarzen Löchern intermediärer Masse in Galaxien, die dynamische Massenbestimmung extrasolarer Planeten, den Ursprung protostellarer Jets und die Abbildung von Sternen und leuchtendem Gas in den durch Staub verdunkelten Umgebungen aktiver Galaxienkerne und Sternentstehungsgebiete, oder von protoplanetaren Scheiben.

Hochgenaue Abbildungssysteme

LUCIFER 1, die erste von zwei identischen tiefgekühlten Kameras und Multiobjekt-Spektrographen für das LBT zum Einsatz im mittleren Infrarot, soll Mitte 2008 vom MPIA zum Mount Graham gebracht werden. Dieses Instrument wird gemeinsam mit der Landessternwarte Heidelberg, dem MPE in Garching, der Universität Bochum und der Fachhochschule für Technik und Gestaltung in Mannheim gebaut und soll im Januar 2009 für den wissenschaftlichen Einsatz bereit stehen. Im seeing-begrenzten Modus besitzt es ein 4×4 Quadratbogenminuten großes Gesichtsfeld. Sobald die adaptiven Sekundärspiegel am LBT arbeiten werden, kann für beide **LUCIFER**-Instrumente in einem 0.5×0.5 großen Gesichtsfeld mit beugungsbegrenzter Auflösung gerechnet werden. Mit adaptiver Optik wird auch eine spektrale Auflösung von mehreren 1000 erreichbar sein. Die wissenschaftlichen Anwendungen der vielseitigen **LUCIFER**-Instrumente sind zahlreich, etwa die Untersuchung von Sternentstehungsgebieten in nahen Galaxien.

Das mit Abstand größte Instrumentierungsprojekt des Instituts ist der Strahlvereiner **LINC-NIRVANA** für das LBT im nahen Infrarot, der gegenwärtig in der Integrationshalle des MPIA gebaut wird. Bei diesem Projekt leitet das MPIA als PI-Institut ein Konsortium, zu dem die italienischen Observatorien (INAF), das MPIfR in Bonn und die Universität Köln gehören. Über die kohärente Zusammenführung der Strahlengänge beider Hauptspiegel mittels Fizeau-Interferometrie wird **LINC-NIRVANA** bei Wellenlängen von 1 bis $2.4 \mu\text{m}$ in einem 10.5×10.5 großen Gesichtsfeld beugungsbegrenzte Bilder liefern, wobei die räumliche Auflösung jener eines 23-m-Tele-

skops entsprechen wird. Multikonjugierte adaptive Optik mit bis zu 20 natürlichen Leitsternen wird eine weitgehende Himmelsüberdeckung gewährleisten. Aufgrund seines großen Gesichtsfelds und seiner astrometrischen Qualitäten reichen die Anwendungsmöglichkeiten des Instruments von der Kosmologie mit Supernovae, Entstehung von Galaxien, Sternpopulationen und Sternentstehung in Galaxien bis zur Struktur zirkumstellarer Scheiben und zur Untersuchung der Planeten des Sonnensystems und ihrer Atmosphären.

Als Co-PI-Institut in Zusammenarbeit mit dem Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire in Grenoble und dem Laboratoire d'Astrophysique in Marseille ist das MPIA an der Entwicklung von **SPHERE** beteiligt, einem VLT-Instrument, das auf die Abbildung jupiterähnlicher extrasolarer Planeten spezialisiert ist. Zur Überwindung des enormen Helligkeitskontrastes zwischen den Planeten und ihren Zentralsternen werden bei **SPHERE** extreme adaptive Optik (XAO), Koronographie und drei für differenzielle Abbildung ausgelegte Fokalebene-Instrumente zum Einsatz kommen, welche Polarimetrie im Sichtbaren, duale Abbildungstechnik im nahen Infrarot, beziehungsweise integrale Feldspektroskopie im *J*-Band ermöglichen werden.

Instrumente für Durchmusterungen

Das Arbeitspferd für die laufenden Durchmusterungen des MPIA ist die Nah-Infrarot-Kamera **OMEGA 2000**, die seit 2003 im Primärfokus des 3.5-m-Teleskops auf dem Calar Alto zum Einsatz kommt. Ihr Gesichtsfeld ist 15.4×15.4 groß und ihr Wellenlängenbereich liegt bei *z* bis *K*.

PANIC, die PANOramic near Infrared Camera, wird der Nachfolger von **OMEGA 2000** sein – eine vielfältig nutzbare Weitfeldkamera für den Einsatz am 2.2-m-Teleskop auf dem Calar Alto, die gemeinsam vom MPIA und dem Instituto de Astrofísica de Andalucía entwickelt wird. Mit ihren vier Detektoren vom Typ **HAWAII2-RG** wird sie ein Gesichtsfeld von $30' \times 30'$ besitzen. Sie eignet sich gleichermaßen für Durchmusterungen extragalaktischer und galaktischer Objekte, wie auch von Objekten des Sonnensystems. Einige der zahlreichen wissenschaftlichen Fragestellungen betreffen Galaxien mit Gammastrahlen-Ausbrüchen, Supernovae, Entfernungsskalen, hochrotverschobene Quasare, Akkretionsscheiben, Post-AGB-Sterne und optische Gegenstücke zu Röntgen-Doppelsternen.

Auch **LAIWO**, der Large Area Imager für das Wise-Observatorium in Israel, wurde am MPIA gebaut. Diese Kamera für den optischen Spektralbereich wurde im Oktober 2007 am dortigen 1-m-Teleskop installiert. Ein Mosaik aus vier CCD-Detektoren mit je 4000×4000 Pixeln liefert ein Gesichtsfeld von einem Quadratgrad. Wichtigste wissenschaftliche Anwendung wird die photometrische Suche nach jupitergroßen extrasolaren Transit-Planeten sein.

Instrumente für die Teleskope der nächsten Generation

Mit Blick auf die Zukunft nimmt das MPIA an den Studien für MIDIR und MICADO, zwei Instrumente für das 42 m große E-ELT, teil. **MIDIR** soll eine Kamera mit Spektrograph für das mittlere Infrarot im Bereich vom L-Band bis mindestens $20\ \mu\text{m}$ werden. Eine breite Auswahl an Auflösungen ist vorgesehen. Adaptive Optik wird beugungsbegrenztes Beobachten erlauben. Forschungsthemen werden hier sein: die Bedingungen im frühen Sonnensystem, die Entstehung und Entwicklung

protoplanetarer Scheiben, Untersuchungen des galaktischen Zentrums und der leuchtkräftigen Zentren naher Galaxien, aktive Kerne hochrotverschobener Galaxien und Gammastrahlen-Ausbrüche bei hoher Rotverschiebung.

MICADO ist das Konzept einer Kamera für das nahe Infrarot mit multikonjugierter adaptiver Optik, die eine 6- bis 7-fach höhere Auflösung als das JWST erreichen soll. In den Spektralbereichen I bis K wird ihre Grenzhelligkeit bei 29 mag liegen. Die Anwendungen reichen von jungen stellaren Objekten in unserer Galaxis bis zur Sternentstehung in hochrotverschobenen Galaxien. Die erreichbare astrometrische Präzision wird die Untersuchung der Umlaufbahnen von Sternen um das Schwarze Loch im galaktischen Zentrum und der Eigenbewegung von Kugelsternhaufen im galaktischen

Abb. 1.5: Das europäische Infrarot-Observatorium HERSCHEL. Der Start der Mission ist für 2009 geplant.



Halo weiter voranbringen. Mit MICADO wird auch die detaillierte Kartierung der Struktur, Sternpopulationen und Staubverteilung in Galaxien bei $z = 1$ möglich sein.

Instrumente für Infrarot-Weltraumastronomie

Die mit ISOPHOT gewonnenen Erfahrungen waren ausschlaggebend für die herausragenden Beiträge des MPIA zum Bau der Infrarotkamera mit Spektrometer PACS. Dieses Instrument wird an Bord des europäischen Infrarot-Observatoriums HERSCHEL arbeiten, eines Weltraumteleskops mit 3,5 Metern Öffnung (Abb. I.5). HERSCHEL wird das größte bis dahin gebaute Weltraumteleskop sein und wertvolle Beobachtungen der kältesten und fernsten, weitgehend noch unerforschten Objekte im Kosmos liefern. Der Satellit und seine Instrumente werden zur Zeit umfassenden Labortests unterzogen. Der Start der Mission ist für das Jahr 2009 vorgesehen.

Das Institut ist auch an führender Position in Deutschland am Nachfolger des Weltraumteleskops HUBBLE, dem James Webb Space Telescope (JWST), beteiligt (Abb. I.6). Das JWST wird einen ausklappbaren Hauptspiegel mit etwa sechs Metern Durchmesser sowie drei Fokalinstrumente erhalten. Im Rahmen eines europäischen Konsortiums entwickelt das MPIA die Kryomechanismen zur Positionierung der optischen Komponenten in einem der drei Fokalinstrumente, genannt MIRI. Dieses Gerät besteht aus einer hochauflösenden

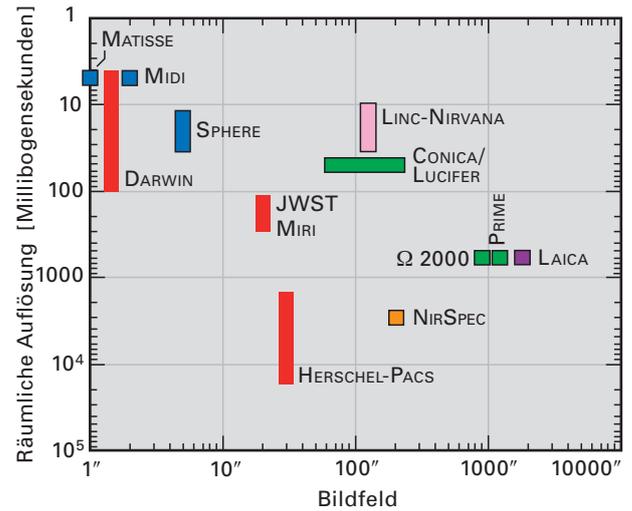
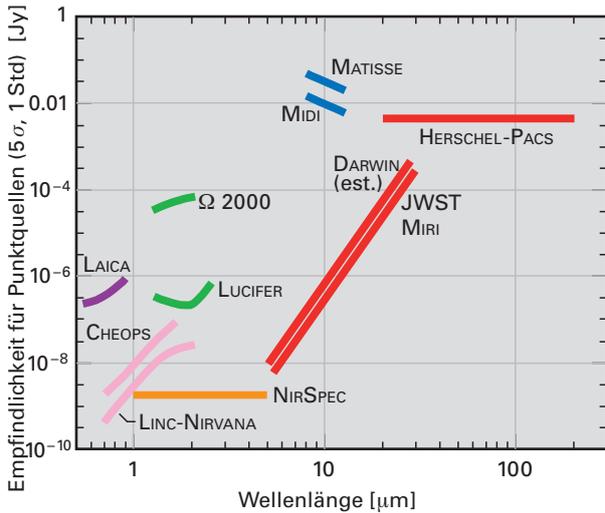
Kamera und einem Spektrometer mittlerer Auflösung. Es ist für den mittleren Infrarotbereich von $5\ \mu\text{m}$ bis $28\ \mu\text{m}$ Wellenlänge ausgelegt. MIRI soll je zur Hälfte von amerikanischen und europäischen Instituten gebaut werden.

Gleichzeitig ist das MPIA an der Entwicklung von NIRSPEC, dem zweiten Fokalinstrument des JWST, einem Multiobjekt-Spektrographen für das nahe Infrarot, beteiligt. Auch hier steuert das Institut kryogene Mechanismen 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. Bei der Entwicklung der feinmechanisch-optischen Herzstücke von MIRI und NIRSPEC besteht eine enge Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Carl Zeiss Optronics, Oberkochen.

Auch an dem Weltraumprojekt GAIA der ESA wirkt das MPIA mit, es spielt bei einem wesentlichen Teilaspekt der Datenanalyse die führende Rolle. 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

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





der Himmelskörper eine große Bedeutung zukommen. Am MPIA wird derzeit (mit Unterstützung des DLR) an Konzepten zur Bewältigung dieser aufwändigen Aufgabe gearbeitet.

EUCLID, eine »Cosmic Visions«-Mission der ESA, dient der Bestimmung der Geometrie des Dunklen Universums auf dem Weg der Untersuchung der Beziehung zwischen Entfernung und Rotverschiebung und der Entwicklung kosmischer Strukturen. Zu diesem Zweck sollen die Morphologie und die Rotverschiebung von Galaxien und Galaxienhaufen bis zu Rotverschiebungen $z = 2$, also zurück bis in die Zeit vor zehn Milliarden Jahren, bestimmt werden – damit wird die gesamte Epoche überdeckt, in der die Dunkle Energie wesentlich zur Beschleunigung der kosmischen Expansion beigetragen hat. Die mit EUCLID verfolgte Strategie wird auf der Messung baryonischer akustischer Schwingungen und des schwachen Gravitationslinsen-Effekts basieren – auf zwei komplementären Verfahren zur Untersuchung der Dunklen Energie. Die mit EUCLID durchgeführte Durchmusterung wird ein 20 000 Quadratgrad großes Himmelsareal außerhalb der Milchstraße im Sichtbaren und im nahen Infrarot mit einer Winkelauflösung von 0'3 abbilden. Von etwa einem Drittel aller Galaxien innerhalb des durchmusteren Areal, die heller sind als 22 mag, wird sie auch Spektren mittlerer Auflösung ($R = 400$) liefern.

PLATO (Planetary Transits and Oscillations of stars) ist eine weitere »Cosmic Vision«-Mission der ESA. Ihr primäres Ziel ist der Aufbau einer Datenbasis für die statistische Analyse extrasolarer Planetensysteme um Sterne, die hell und nah genug sind, um sie (simultan oder später) detailliert untersuchen zu können. PLATO wird 100 000 Sterne mit einer photometrischen Genauigkeit von besser als ± 1 ppm pro Monat und 500 000 Sterne etwas weniger genau vermessen. Die seismologische Analyse die-

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

ser Daten wird die Bestimmung der Massen von Sternen und Planeten mit einer Genauigkeit von bis zu einem Prozent, die Entdeckung erdähnlicher Planeten und die Bestimmung des Alters der untersuchten Systeme mit einer Unsicherheit von wenigen hundert Millionen Jahren erlauben. PLATO wird ein enormes, 557 Quadratgrad großes Gesichtsfeld besitzen. Die erforderliche kurze Brennweite führte zu dem Konzept eines Bündels von 28 identischen kleinen Teleskopen, die jedes eine Sammelfläche von 0.01 Quadratmeter besitzen.

SPICA, das Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics, ist die dritte astronomische Mission aus ESAs Programm »Cosmic Vision«, an dem das MPIA in der Studienphase beteiligt ist. Es soll die nächste Weltraummission für Beobachtungen im fernen Infrarot nach HERSCHEL sein. Die Mission soll 2017 starten und wird ein kaltes 3.5-m-Teleskop beinhalten. Dank dieser großen und kalten Öffnung wird SPICA eine um zwei Größenordnungen schwächere Grenzhelligkeit erreichen als heutige Weltraumteleskope wie HERSCHEL. SPICA wird unter der Leitung der japanischen Weltraumbehörde JAXA stehen. Europa wird sich an der Mission mit dem Ferninfrarot-Instrument SAFARI, dem Hauptspiegel des Teleskops und Teilen des Bodensegments beteiligen.

Abb. I.7. gibt einen Überblick über die wichtigsten bereits arbeitenden und demnächst in Betrieb gehenden Instrumente des MPIA. 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 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 der Universität Heidelberg (ZAH) 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. 439, »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).

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 herausragende 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. Weiterhin ist hier die Beteiligung an der Festlegung neuer Abbildungsfähigkeiten des VLT-Interferometers zu nennen. 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.

Das MPIA beteiligt sich an einer Reihe von EU-Netzwerken und weltweiten Kollaborationen (Abb. I.9), 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.

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 protoplanetarischer Scheiben und Planeten untersucht werden.

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



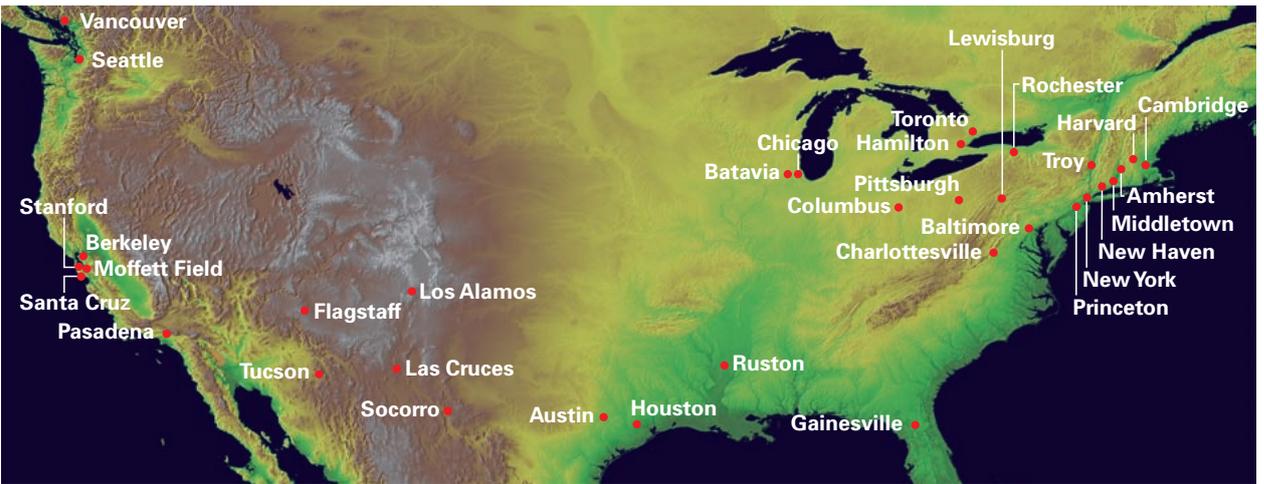


Abb. 1.9: Verteilung der internationalen Partnerinstitute des MPIA.

SPITZER Legacy Program: SPITZER, das Infrarotteleskop der NASA, begann am 25. August 2003 seine für die Dauer von zweieinhalb Jahren geplante Mission. Im Rahmen eines so genannten Legacy Program erhalten Kollaborationen die Möglichkeit, groß angelegte Beobachtungsprogramme durchzuführen. Das MPIA beteiligt sich an einem solchen Programm zur Untersuchung der frühesten Stadien der Sternentstehung in nahen Galaxien (SINGS) und in unserem Milchstraßensystem. Im Rahmen des FEPS Legacy Program (Formation and Evolution of Planetary Systems) in Zusammenarbeit mit dem Steward Observatory und Kollegen in anderen Instituten ist das MPIA verantwortlich für die Auswertung der spektroskopischen Daten. Im Rahmen von SINGS leitet das MPIA die Auswertung der Radiodaten und der Beobachtungen an Zwerggalaxien.

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

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. Das MPIA trat als erstes von bis heute zwölf europäischen Partnerinstituten, und als einziges gleich zu Beginn, dem SDSS-Konsortium bei. Für die Sach- und Geldbeiträge des MPIA zum SDSS erhalten einige Mitarbeiter des Instituts die vollen Datenrechte. Im Jahr 2005 wurde die ursprüngliche SDSS-Durchmusterung abgeschlossen, aber es wurde die Erweiterung SDSS-II/SEGUE beschlossen – sie zielt unter anderem auf die Struktur des Milchstraßensystems ab, ist bereits weit fortgeschritten und wird Mitte 2008 abgeschlossen sein.

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 Fortgeschrittenpraktika an oder ermöglicht den Studierenden die Teilnahme an etwa zwei Monate dauernden »Mini-forschungsprojekten«, 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 bietet für etwa 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 des Jahres 2007 war die »Nacht der Wissenschaft«, in der eine ganze Reihe von Einrichtungen und Instituten der gesamten Region ihre Türen bis nach Mitternacht für das allgemeine Publikum öffneten. Aufgrund der abgelegenen Lage des Königstuhls und der vielfältigen alternativen Angebote in der Stadt hatten wir keinen großen Andrang erwartet. Aber wie in Kapitel V.2 beschrieben, war der Andrang des Publikums im MPIA überwältigend, und bei acht öffentlichen Vorträgen unserer Reihe »Astronomie am Sonntag Vormittag«, die im Berichtsjahr zum zweiten Mal stattfanden, war der große Hörsaal des Instituts jedes Mal »ausverkauft«.

Für Gymnasiasten wurde am MPIA in Zusammenarbeit mit der Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl und dem Astronomischen Rechen-Institut, Heidelberg im Rahmen der Berufsorientierung an Gymnasien (BOGy) ein Schüler-Praktikum durchgeführt. Und auch 2007 beteiligte sich das MPIA wieder am *Girls' Day*, einer bundesweiten Aktion, mit der Schülerinnen ermuntert werden sollen, sich beruflich in Bereichen zu orientieren, die vorwiegend noch eine Domäne der Männer sind. Etwa 60 Schülerinnen erhielten an verschiedenen Stationen einen Einblick in die Arbeit an einem astronomischen Institut (Kap. V.1).

Am MPIA wird die seit 1962 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; an Schulen der Ober- und Mittelstufe wird sie gerne im Physik- und Astronomieunterricht eingesetzt.

II. Highlights

II.1 Jüngster extrasolarer Planet in zirkumstellarer Scheibe entdeckt!

Die Frage, wie Planeten entstehen, hat die Astronomen seit jeher fasziniert. Doch erst die Entdeckung eines extrasolaren Planeten, der einen sonnenähnlichen Stern umkreist, hat im Jahr 1995 diesem Forschungszweig der Astronomie in beobachterischer wie theoretischer Hinsicht einen enormen Auftrieb verliehen. Am MPIA bilden die Suche nach extrasolaren Planeten und die numerische Simulation der Planetenentstehung einen wichtigen Forschungsschwerpunkt.

Im Rahmen eines langfristigen Suchprogramms entdeckte nun ein Team des Instituts bei dem nur acht bis zehn Millionen Jahre alten Stern TW Hydrae den bislang jüngsten bekannten Exoplaneten. Diese Entdeckung liefert erstmals eine obere Grenze für die Entstehungszeit von Planeten der Größe Jupiters. Da der Zentralstern noch eine zirkumstellare Scheibe aus Gas und Staub besitzt, ist auch erstmals der direkte Beweis erbracht, dass in Scheiben dieser Art tatsächlich Planeten entstehen. Darüberhinaus wurde ein weiterer Begleiter eines etwa 100 Millionen Jahre alten Sterns gefunden.

Die bisher erfolgreichste Methode zur Suche und Entdeckung von Exoplaneten ist die Doppler- oder Radialgeschwindigkeitsmethode. Sie beruht auf dem Dopplereffekt, wonach Licht zu größeren bzw. kleineren Wellenlängen verschoben wird, wenn sich Lichtquelle und Empfänger voneinander weg bzw. aufeinander zu bewegen. Umkreist ein Planet einen Stern, so bewegen sich beide Körper um den gemeinsamen Schwerpunkt, der im Allgemeinen noch im Innern des Sterns liegt. Der Planetenumlauf bewirkt somit eine periodische Bewegung des Sterns, die sich in seinem Spektrum als periodisch wechselnde Doppler-Verschiebung der Spektrallinien äußert und so die Existenz des nicht direkt sichtbaren Planeten verrät. Die Messdaten liefern unmittelbar die Umlaufdauer des Planeten und eine untere Grenze für seine Masse. Die wahre Masse lässt sich berechnen, wenn die Neigung der Umlaufbahn gegen die Himmelsebene bekannt ist.

Bis Ende 2007 waren etwa 250 extrasolare Planeten bekannt. Sie alle umkreisen Sterne, die mindestens 100 Millionen Jahre alt sind (Abb. II.1.1). Bei jüngeren Sternen ließ sich die Doppler-Methode bislang aus mehreren Gründen nicht anwenden. So rotieren die meisten jungen Sterne sehr schnell. Dies verbreitert die Spektrallinien und verringert die Genauigkeit, mit der sich die Doppler-Verschiebung messen lässt. Hinzu kommt eine häufig starke und zeitlich variable Aktivität junger Sterne, wie Pulsationen, Rotationsschwankungen

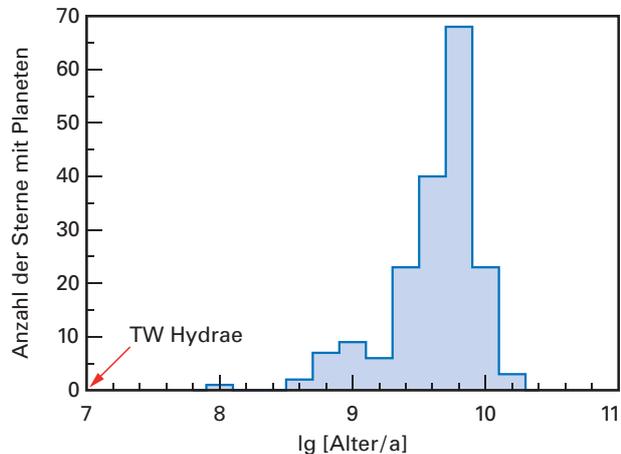


Abb. II.1.1: Die Altersverteilung der bis Ende 2007 bekannten extrasolaren Planeten.

und das Auftreten von Sternflecken. All diese Phänomene erschweren die Suche nach periodischer Variabilität in den Spektren.

Ein Forscherteam des MPIA hat dennoch schon sehr früh damit begonnen, Planeten bei jungen Sternen zu suchen. Im Jahr 2003 startete das Programm mit dem Fibrefed Extended Range Optical Spectrograph (FEROS) am MPG/Eso 2.2-m-Teleskop auf La Silla in Chile. Das Programm umfasste etwa 200 Sterne, deren Alter zwischen 8 und 300 Millionen Jahren und deren Entfernung bei maximal etwa 500 Lichtjahren liegt. Etwa 30% dieser Sterne wiesen eine überraschend geringe stellare Aktivität und relativ geringe Rotationsgeschwindigkeiten auf. Damit eigneten sie sich besonders gut für die Radialgeschwindigkeitsmethode. Die Radialgeschwindigkeiten ließen sich mit einer Genauigkeit von ± 10 m/s messen, so dass insbesondere massereiche Planeten in geringer Entfernung von ihrem Zentralstern, auch »heiße Jupiter« genannt, gut nachweisbar waren.

Der Planet von TW Hydrae

Üblicherweise nutzt man zur Bestimmung der Dopplerverschiebung eines Sterns gleichzeitig sehr viele Absorptionslinien in seinem Spektrum. Bei den jungen Sternen schloss das MPIA-Team dagegen jene Spektrallinien aus, die von stellarer Aktivität besonders stark betroffen sind. Dazu gehören die Linien Ca II H & K, H α und H β , sowie

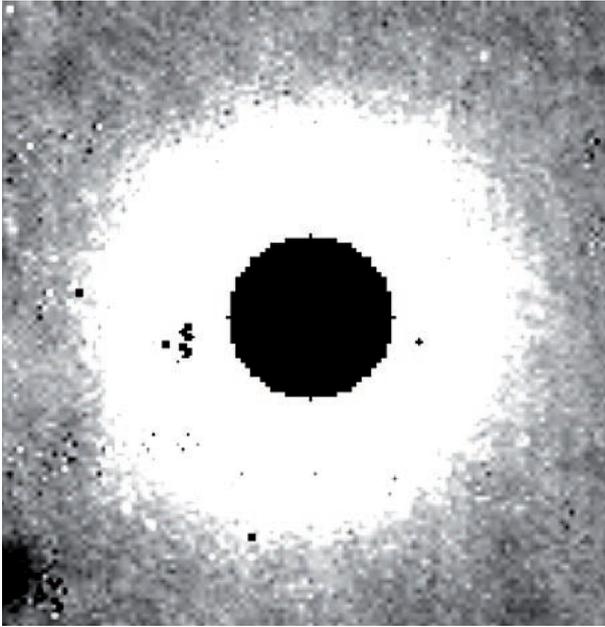


Abb. II.1.2: Die Staubscheibe um TW Hya, aufgenommen mit der Kamera WFPC2 an Bord des Weltraumteleskops HUBBLE. Der Zentralstern ist mit einer koronographischen Scheibe abgedeckt. (Aufnahme: D. E. Trilling, NASA/ESA)

He I und Na I. Bei etwa 1300 verbleibenden Linien wurde über den Vergleich mit einem theoretischen Spektrum nach periodischen Doppler-Verschiebungen gesucht.

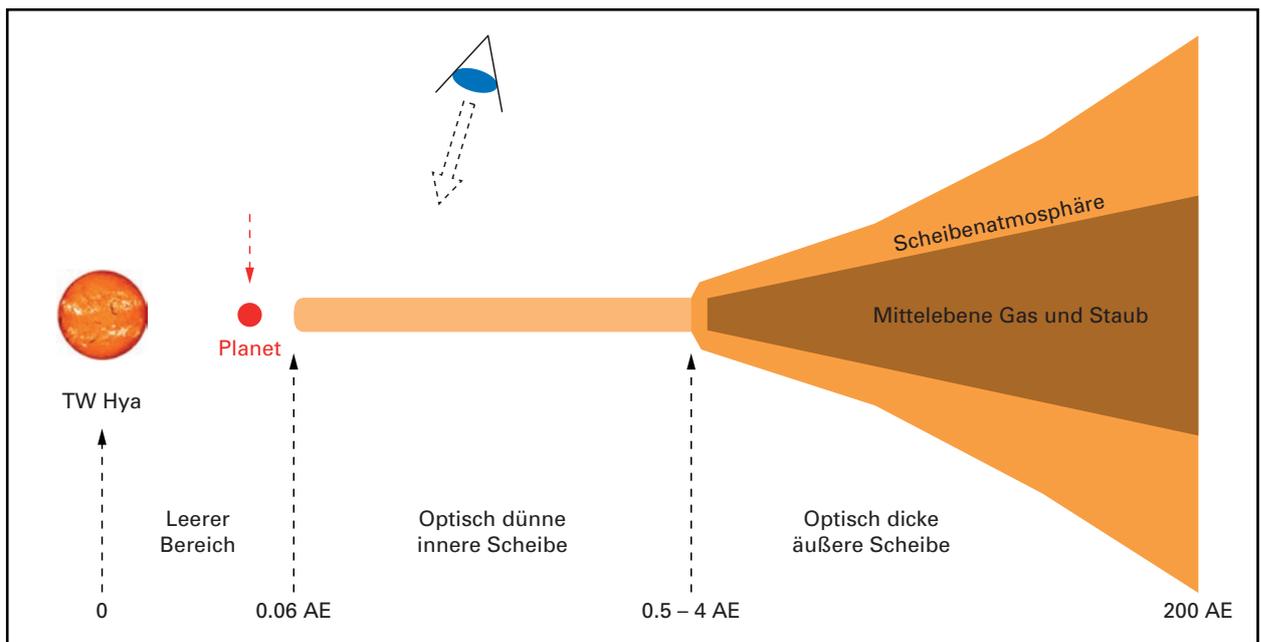
Fündig wurde das Team schließlich bei dem 180 Lichtjahre entfernten Stern TW Hya. Er gehört zu den am besten untersuchten jungen Sternen der Sonnenumgebung. Seine Masse beträgt etwa 0.7 Sonnenmassen, seine Leuchtkraft 0.2 Sonnenleuchtkräfte und sein Alter liegt

bei 8 bis 10 Millionen Jahren. Aufnahmen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE zeigten eine ausgedehnte Staubscheibe, auf die man fast senkrecht blickt (Abb. II.1.2). Weitere Beobachtungen ließen darauf schließen, dass ihr Neigungswinkel zum Sehstrahl etwa 7 Grad beträgt. Außerdem hatten Untersuchungen im nahen und mittleren Infrarot sowie im Millimeterbereich weitere Eigenschaften der Scheibe enthüllt (Abb. II.1.3). Demnach besitzt sie im Zentrum ein »Loch«, dessen Innenrand sich bei etwa 0.06 Astronomischen Einheiten befindet. Nach außen hin schließt sich daran eine optisch dünne Scheibe an, die in einem Entfernungsbereich von 0.5 bis 4 AE in eine optisch dicke Scheibe übergeht.

Schon 2005 hatte es Spekulationen darüber gegeben, ob möglicherweise ein Planet für diese Struktur der Scheibe verantwortlich sein könnte. Doch nachweisen ließ er sich nicht. Das Team vom MPIA fand jetzt einen Körper, der seinen Stern in extrem geringem Abstand umkreist.

Die Spektren weisen Doppler-Schwankungen mit Perioden von 0.78, 1.36 und 3.56 Tagen auf. Während die ersten beiden als nicht signifikant eingestuft wurden, lässt sich die dritte auf die Schwerkraftwirkung eines unsichtbaren Planeten zurückführen, der den Stern mit einer Periode von 3.56 Tagen in einem Abstand von 0.04 AE umkreist (Abb. II.1.4). Damit bewegt sich der Planet innerhalb des Lochs am Innenrand der dünnen Scheibe. Nimmt man an, dass die Bahnebene des Planeten und die zirkumstellare Scheibe koplanar sind, so ergibt sich die Masse des Planeten zu 9.8 Jupitermassen.

Abb. II.1.3: Die Struktur der Scheibe um TW Hya, wie sie sich aus Beobachtungen in mehreren Wellenlängenbereichen ergibt.



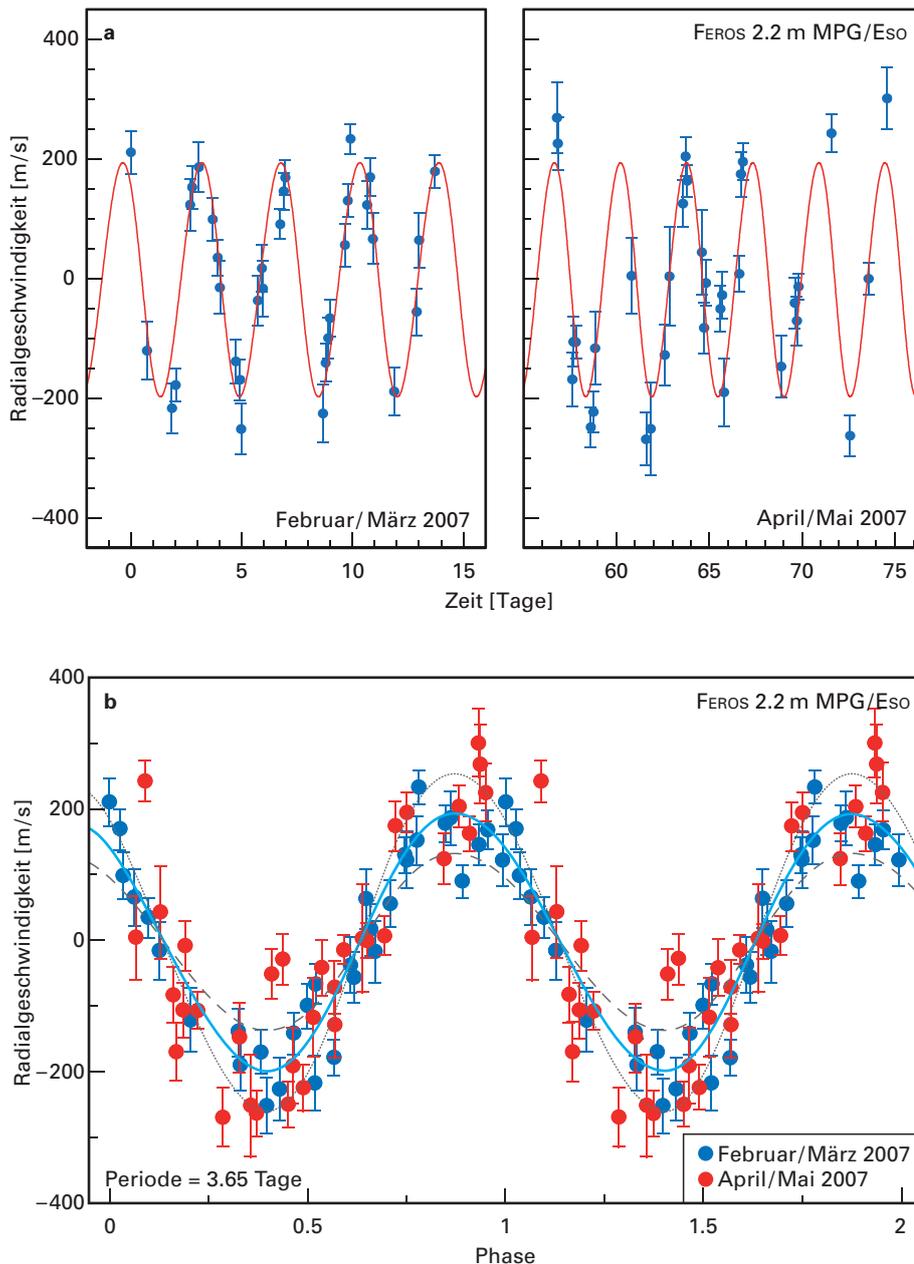


Abb. II.1.4: Die Radialgeschwindigkeit im Spektrum von TW Hya wurde in insgesamt 32 Nächten im Frühjahr 2007 gemessen. Ihre Variation mit einer Periode von 3.56 Tagen wird durch den Umlauf eines Planeten verursacht.

Um stellare Aktivität als Ursache für diese Linienverschiebung auszuschließen, führten die Astronomen mehrere Tests durch. So haben Sternrotation und nichtradiale Pulsationen zur Folge, dass sich die Linienform periodisch verändert und damit eine variable Radialgeschwindigkeit vortäuscht. Eine genaue Analyse zeigte, dass dies bei TW Hya nicht der Fall ist. In einer so genannten Bisektor-Analyse suchten die Astronomen auch nach einer Korrelation zwischen der Radialgeschwindigkeitsvariation

und Parametern, die normalerweise stellare Aktivität anzeigen. Es konnte keine signifikante Korrelation gefunden werden. Damit bleibt ein umlaufender Planet als wahrscheinlichste Ursache für den periodisch variablen Doppler-Effekt übrig.

Schnelle Planetenentstehung und Migration

Die Entdeckung des TW Hydrae b genannten Planeten liefert wichtige neue Hinweise für Theorien der Planetenentstehung. Bisher war aus statistischen Untersuchungen bekannt, dass die Lebensdauer zirkumstellarer Scheiben im Mittel einige zehn Millionen Jahre beträgt. Dieser Zeitraum steht somit für die Bildung von Planeten

in der Scheibe maximal zur Verfügung. Die Beobachtung von TW Hya b liefert erstmals eine echte obere Grenze für die zur Planetenentstehung erforderliche Zeitspanne: Sie kann nicht mehr als acht bis zehn Millionen Jahre beitragen haben. Somit ist TW Hya der ideale Prüfstein für numerische Modelle der Bildung von Planeten.

TW Hya b steckt zum einen den Zeitrahmen für die Planetenentstehung ab. Gleichzeitig stellt der Planet die Theoretiker erneut vor die Frage, wie ein derart massereicher Körper seinen Zentralstern in solch geringem Abstand umkreisen kann. Unter den bislang bekannten Exoplaneten gibt es eine Reihe dieser heißen Jupiter. Sie alle sind nach der heute gängigen Theorie der Planetenentstehung nicht dort entstanden. Nahe am Stern war stets zu wenig Materie vorhanden und es war dort zu heiß. Daher geht man davon aus, dass sich die Planeten in den weiter außen liegenden, kühlen und dichten Bereichen der zirkumstellaren Scheibe bilden. Anschließend führt ein Austausch von Drehimpuls zwischen dem Scheibenmaterial und dem Planeten dazu, dass dieser langsam auf einer spiralförmigen Bahn an den Zentralstern heranwandert.

Computersimulationen, wie sie auch am MPIA durchgeführt werden, haben gezeigt, dass ein Planet, der in einem Abstand von fünf Astronomischen Einheiten von seinem Zentralstern entsteht, innerhalb von mehreren tausend Jahren eine Lücke in der Scheibe frei fegt (Jahresbericht 2006, S. 27). Gleichzeitig wandert er nach innen. Bereits nach wenigen zehntausend Jahren hat er seinen Abstand zum Stern halbiert und seine Masse verdoppelt, denn während der Migration sammelt er Materie aus seiner Umgebung auf.

Eine entscheidende Frage ist nun: Wann und wodurch kommt die Wanderung zum Stillstand? Ist das nahezu materiefreie Loch im Zentrum einer Scheibe hierfür verantwortlich? Die Bahn von TW Hya b am Innenrand der Scheibe scheint diese Hypothese zu unterstützen. Theoretisch zwingend ist sie jedoch nicht. Ob weitere Bremseffekte, wie Magnetfelder oder Gezeitenkräfte eine Rolle spielen, ist zur Zeit Gegenstand der Forschung. Letztlich wird auch eine alternative Theorie untersucht, bei der ein Planet nicht durch langsames Aufsammeln von Staub und Gas aus der Umgebung, sondern wie ein Stern durch direkte Kontraktion entsteht. Möglicherweise kann TW Hya b in Zukunft weitere Hinweise zur Entscheidung zwischen den beiden Möglichkeiten liefern.

Ein weiterer Planet um HD 70573

Die Astronomen des MPIA konnten bei ihrem Suchprogramm noch einen weiteren Erfolg verbuchen. Bei dem 150 Lichtjahre entfernten Stern HD 70573 entdeckten sie eine periodische Doppler-Verschiebung mit einer Periode von 852 Tagen. Auch hier ergab die Bisektor-Analyse keine Korrelation mit Signaturen der Sternaktivität, so dass die wahrscheinlichste Erklärung wiederum ein unsichtbarer Planet ist. Da in diesem Fall die Bahnneigung unbekannt ist, lässt sich für seine Masse nur eine untere Grenze von 6.1 Jupitermassen angeben. Hierbei wird angenommen, dass der Stern, ein G-Zwerg, eine Masse von genau einer Sonnenmasse besitzt.

HD 70573 gehört der Herkules-Lyra-Assoziation an, einer Bewegungsgruppe, deren Alter auf 200 Millionen Jahre geschätzt wird. Eine Analyse des Sternspektrums (Äquivalentbreite der Lithium-Linie bei 670.8 nm) ergab ein Alter zwischen 78 und 125 Millionen Jahren. Damit ist der gleichaltrige Planet nach TW Hya b der zweitjüngste bekannte extrasolare Planet.

Der Fund eines Planeten bei HD 70573 ist auch deswegen bedeutend, weil dieser Stern zu einem Forschungsprogramm am Weltraumteleskop SPITZER gehört (SPITZER/FEPS Legacy Program), in dem die Beziehung zwischen älteren Staubscheiben (sogenannten Debris-Scheiben) und Planeten untersucht wird.

Die beiden beschriebenen Entdeckungen haben bewiesen, dass es trotz anfänglicher Bedenken durchaus möglich ist, Planeten bei jungen Sterne nachzuweisen. Dies eröffnet insbesondere der Erforschung der Planetenentstehung ganz neue Möglichkeiten. Neben diesem Programm werden am MPIA gegenwärtig Beobachtungsinstrumente der nächsten Generation entwickelt und gebaut, die extrasolare Planeten auch mit anderen Methoden aufspüren sollen: direktes Abbilden, astrometrische Messung der scheinbaren Bewegung des Sterns am Himmel und die Messung der Helligkeitsveränderung des Zentralsterns, wenn der Planet vor ihm vorbeizieht (Transitphotometrie).

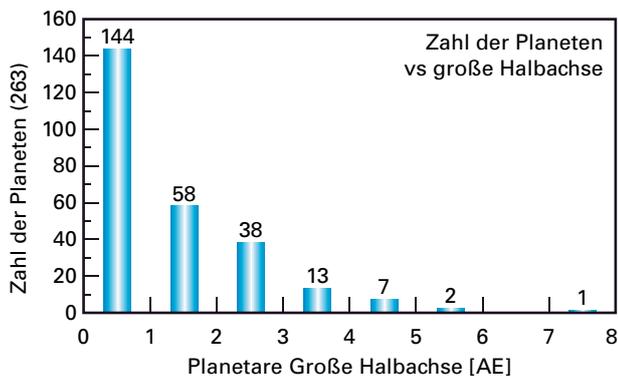
*Johny Setiawan, Thomas Henning,
Ralf Launhardt, André Müller,
Patrick Weise, Martin Kürster*

II.2 Eine Suche nach Exoplaneten bei 54 nahen Sternen

Bislang konnte kein einziger der etwa 250 extrasolaren Planeten, die bis Ende 2007 entdeckt wurden, zweifelsfrei direkt abgebildet werden. Die überwiegende Zahl wurde indirekt mit der sogenannten Radialgeschwindigkeitsmethode gefunden. Diese Methode ist allerdings für Planeten in großer Entfernung vom Stern wegen ihrer langen Umlaufdauer sehr ineffizient. Ein internationales Astronomenteam um Wolfgang Brandner und Rainer Lenzen vom MPIA sowie Beth Biller und Laird Close vom Steward Observatory, Arizona, hat mit einer speziellen Kamera, dem Simultaneous Differential Imager (SDI), bei 54 nahen, überwiegend jungen Sternen nach jupiterähnlichen Planeten gesucht. Das Ergebnis sind die derzeit kontrastreichsten Aufnahmen dieser Art, die jemals vom Boden oder vom Weltraum aus gewonnen wurden. Dennoch fanden die Astronomen keinen Planeten. Dieses negative Ergebnis liefert strenge obere Grenzen für das Vorkommen massereicher Exoplaneten in Entfernungen jenseits von 5 AE von ihrem Zentralstern.

Die Radialgeschwindigkeitsmethode zum Nachweis extrasolarer Planeten beruht darauf, dass ein Stern und sein Planet um ihren gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Dies äußert sich in einer periodischen Schwankung der Absorptionslinien im Spektrum des Sterns (siehe Kapitel II.1 in diesem Jahresbericht). Um einen Planeten sicher nachzuweisen, muss man ihn daher mindestens über einen kompletten Umlauf beobachten. Bei einem Planeten in etwa 5 AE Abstand vom Stern (entsprechend unserem Planeten Jupiter) liegt die Umlaufdauer aber bereits im Bereich von zehn Jahren. So ist es nicht verwunderlich, dass die meisten bisher entdeckten Exoplaneten ihren

Abb. II.2.1: Die Verteilung der bis Ende 2007 bekannten extrasolaren Planeten in Abhängigkeit von der großen Halbachse (Quelle: exoplanet.eu).



Stern auf sehr engen Bahnen umkreisen, wo die Perioden im Bereich von Tagen liegen. Ende 2007 waren nur drei Planeten mit einem größeren Abstand als 5 AE bekannt (Abb. II.2.1).

Es bleibt aber die Frage: Handelt es sich bei diesem Befund um einen beobachtungsbedingten Auswahleffekt, oder sind große Gasplaneten in solch großen Entfernungen von ihrem Zentralstern wirklich eine Seltenheit? Dieser Frage gingen die Astronomen des MPIA und ihre Kollegen in der neuen Durchmusterung nach.

Auf Planetensuche mit Naco SDI

In jüngster Zeit wurden weltweit einige Instrumente gebaut, die auf den Nachweis naher Sternbegleiter spezialisiert sind. So wurden seit 2003 mehrere Beoberkungskampagnen durchgeführt, um Exoplaneten mit Hilfe von Kameras mit adaptiver Optik zu finden, doch sie blieben alle erfolglos.

Obwohl adaptive Optiken mittlerweile ausgereift sind, gibt es noch ein grundsätzliches Problem, mit dem sie zu kämpfen haben und das die Entdeckung von Exoplaneten erschwert: Das Auftreten sogenannter Superspeckles (körniger Strukturen im erzeugten Bild). Sie haben ihre Ursache in einer sich langsam während der Beobachtung verändernden instrumentellen Aberration. Diese Superspeckles entwickeln sich zufällig auf einer Zeitskala von Minuten und variieren mit der Wellenlänge. Das Ergebnis ist ein korreliertes Speckle-Rauschen, das sich nur sehr schwer kalibrieren und aus den Daten entfernen lässt. Dies hat zur Folge, dass sich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis ab einer bestimmten Belichtungszeit nicht mehr verbessern lässt, weil das Speckle-Rauschen zu stark ist. Theoretische Betrachtungen zeigen, dass sich wegen dieses Effekts ein Helligkeitskontrast von 1000 zwischen Stern und Begleiter nicht überschreiten lässt, was für die Entdeckung extrasolarer Planeten eine erhebliche Einschränkung bedeutet. Selbst das Weltraumteleskop HUBBLE leidet unter Superspeckles. Ursache sind Temperaturvariationen während der Belichtung, die zu einer Veränderung der Punktverbreiterungsfunktion führen.

Am MPIA wurde eine Kamera entwickelt, mit der sich dieses Problem erheblich verringern lässt. Das Instrument namens NACO SDI (NACO Simultaneous Differential Imager) wurde eigens für die Aufgabe gebaut, kühle, lichtschwache Objekte in der nahen Umgebung eines Sterns aufzunehmen. Es arbeitet nach folgendem Prinzip: Die Kamera enthält eine Adaptive Optik (NACO), welche die durch Turbulenzen der Erdatmosphäre verursach-

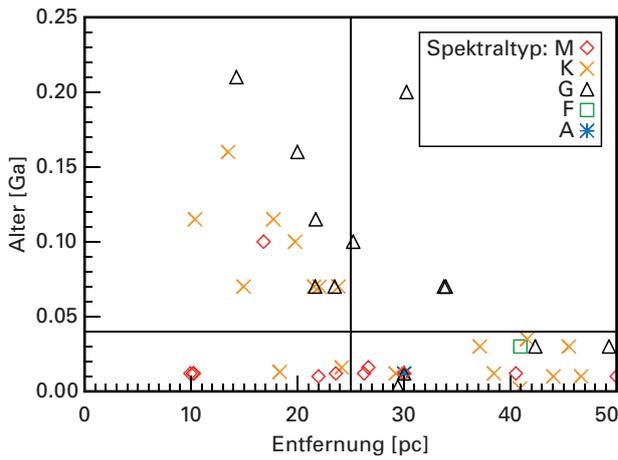


Abb. II.2.2: Alter und Entfernungen der in der Durchmusterung beobachteten Sterne.

te Unschärfe beseitigt. Die Zusatzoptik SDI zerlegt das Licht eines einzelnen Sterns in vier identische Bilder bei benachbarten Wellenlängen. Diese liegen inner- und außerhalb der für massearme Objekte (Gasplaneten oder einige Braune Zwerge) charakteristischen, infraroten Methanbanden. Auf geeigneten Differenzbildern dieser vier Aufnahmen verschwindet der Hauptstern mit seinem hellen Lichthof nahezu vollständig, und der massearme, kühle Begleiter wird deutlich erkennbar (Abb. II.2.3).

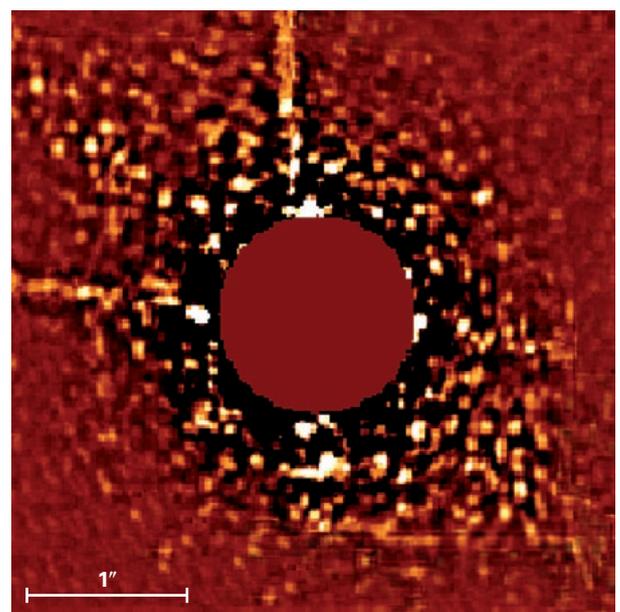
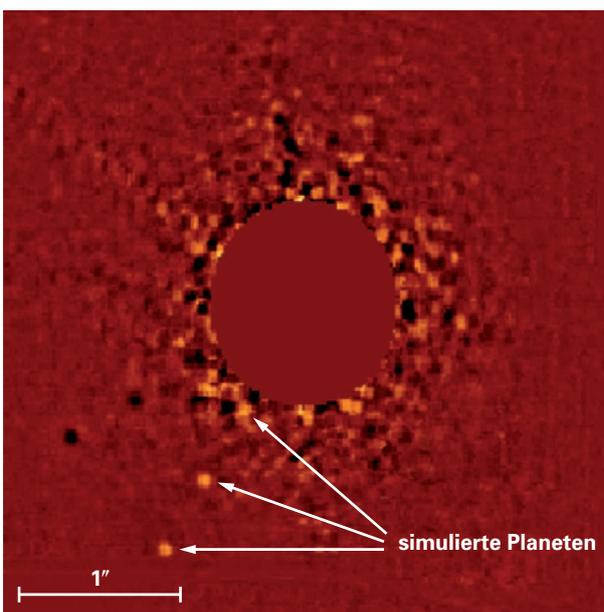
Schon in der Testphase von NACO SDI gelang eine bedeutende Entdeckung, als das 12 Lichtjahre entfernte Objekt ν Indi B in zwei T-Zwerge getrennt werden konnte. Die beiden Komponenten ν Indi Ba und ν Indi Bb sind die nächsten bekannten Braunen Zwerge (Jahresbericht 2005, S. 22). Weitere Erfolge kamen hinzu. So wurde mit AB Dor C der bislang lichtschwächste, nur 0.16 Bogensekunden vom Hauptstern entfernte Begleiter ent-

deckt, und bei Gl 86B, dem bislang einzigen bekannten Weißen Zwerg in einem Exoplanetensystem, konnte die Umlaufbewegung nachgewiesen werden. Weiterhin wurde der zweitnächste Braune Zwerg entdeckt (Jahresbericht 2006, S. 20). Das Objekt mit der Bezeichnung SCR 1845-6357B steht 12.7 Lichtjahre entfernt und umkreist einen massearmen Stern der Spektralkasse M 8.5.

In einer großangelegten Durchmusterung suchten Rainer Lenzen, Wolfgang Brandner und ihr Team in den Jahren 2004 bis 2006 bei insgesamt 54 Sternen nach Planeten. Bei der Auswahl konzentrierten sie sich auf 45 junge und nahe (bis zu 250 Millionen Jahre alte und 160 Lichtjahre entfernte) Sterne. Genauer waren bis zu 80 Lichtjahre entfernte Sterne jünger als 250 Millionen Jahre und bis zu 150 Lichtjahre entfernte Sterne jünger als 40 Millionen Jahre (Abb. II.2.2). Der Grund für diese Unterscheidung liegt darin, dass sich Planeten nach ihrer Entstehung abkühlen, so dass sich der Helligkeitskontrast zwischen Planet und Zentralstern (der die Entdeckung erschwert) mit zunehmendem Alter vergrößert. Zu diesen 45 nahen, jungen Sternen kamen drei Sterne hinzu, bei denen mit der Radialgeschwindigkeitsmethode bereits Planeten nachgewiesen waren, und vier ältere Sterne, die aber mit Entfernungen bis 65 Lichtjahre sehr nahe sind, sowie zwei weiter entfernte (490 Lichtjahre), sehr junge Sterne.

Die Beobachtungen fanden am Very Large Telescope (VLT) sowie mit einer zweiten Kamera am Multiple Mirror Telescope (MMT) in Arizona statt. Jede Aufnahmeserie wurde bei zwei unterschiedlichen Drehwinkeln der Kamera durchgeführt. Dies hat den Vorteil,

Abb. II.2.3: Vollständig reduzierte Aufnahmen des Sterns AB Dor A mit drei simulierten Begleitern. *Links:* Daten von NACO SDI, *rechts:* normale Aufnahmen mit Adaptiver Optik.



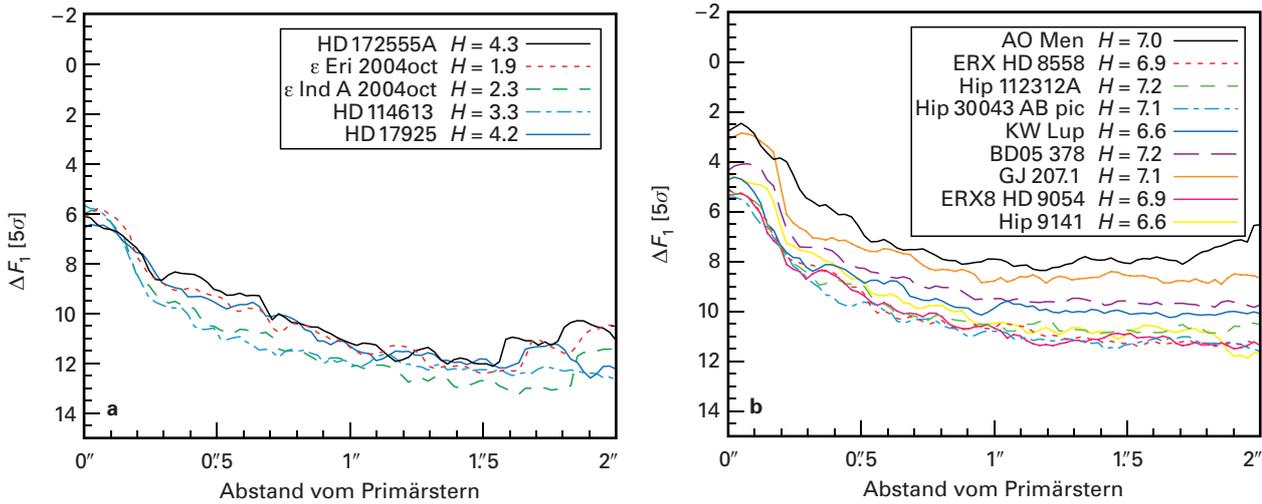


Abb. II.2.4: Erzielter Helligkeitskontrast in Abhängigkeit vom Abstand zum Stern. a) Sterne mit Helligkeiten $H < 4.5$, b) Sterne mit $7.5 > H > 6.5$.

dass ein möglicher Sternbegleiter an zwei unterschiedlichen Orten des Detektors abgebildet wird. So lassen sich vorgetäuschte Planetenbilder, die auf Rauschen beruhen, leichter identifizieren.

Die Stärke des Instruments dokumentiert Abb. II.2.3. In der linken Aufnahme des 50 Lichtjahre entfernten Sterns AB Dor A wurden die NACO-SDI-Aufnahmen bei zwei Drehwinkeln nach allen Regeln der Kunst reduziert. Außerdem wurden zwei Planetenbilder in Abständen von 0.55, 0.85 und 1.35 Bogensekunden Abstand künstlich in die Daten eingefügt, die bei 1.575 μm Wellenlänge (H-Band) um einen Faktor 10 000 schwächer sind als der Stern. Zumindest die beiden äußeren »Planeten« lassen sich eindeutig identifizieren. Bei einer herkömmlichen Aufnahme mit Adaptiver Optik (rechts) wäre dies nicht möglich.

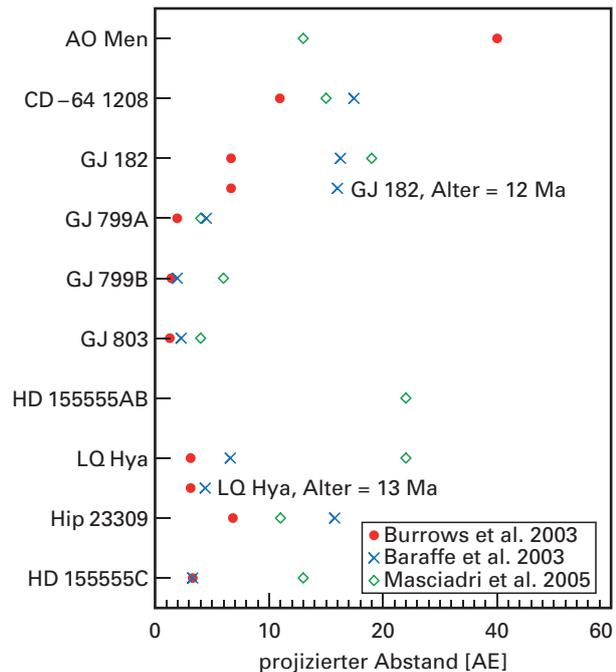
Letztlich konnten die Astronomen jedoch bei keinem der 54 Sterne einen Begleiter nachweisen. Doch auch diesem negativen Ergebnis kann man neue Erkenntnisse entnehmen, wenn man die Nachweisempfindlichkeit der Apparatur genau kennt. Dafür war eine strenge Analyse nötig.

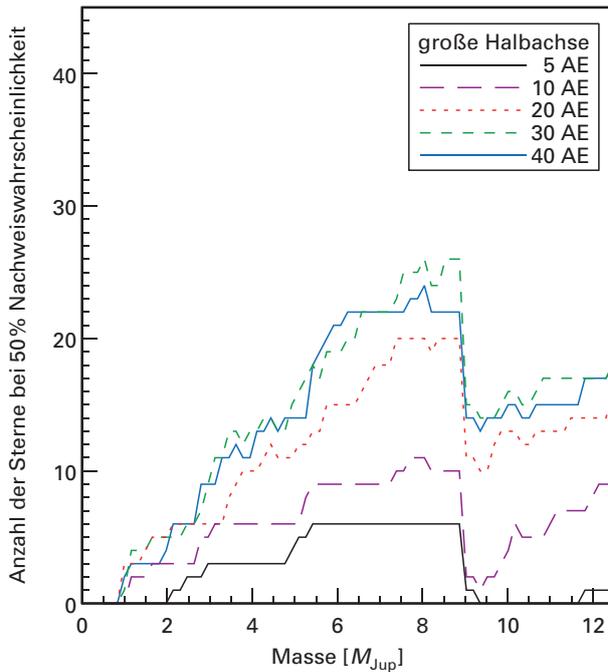
Zum einen wurde der in den Aufnahmen erreichte Helligkeitskontrast zwischen Stern und Planet in Abhängigkeit vom gegenseitigen Abstand ermittelt. Dieser Kontrast ist nicht nur von der scheinbaren Helligkeit des Sterns, sondern auch vom Seeing abhängig und erfordert daher eine individuelle Analyse aller Aufnahmen. Dann wurden diese Werte mit heutigen Modellen für die Spektren von Exoplaneten verglichen. Nach derzeitigen Theorien sollte die Temperatur eines Riesenplaneten, der älter als zehn Millionen Jahre ist, auf unter 800 K gesunken sein und einen Spektraltyp T8 oder später besitzen.

Abb. II.2.4 a zeigt exemplarisch für Sterne, die im H-Band heller als 4.5 mag sind, den erzielten Hellig-

keitskontrast mit einer Signifikanz von 5σ . In einem Abstandsbereich von einer halben bis einer Bogensekunde wurde demnach ein Kontrast von 10 bis 12 mag erzielt. Das entspricht Intensitätsfaktoren zwischen 10 000 und 60 000 und übertrifft somit die oben erwähnte Grenze des Superspeckle-Rauschens um mehr als eine Größenordnung. Es handelt sich derzeit um die kontrastreichsten Aufnahmen von methanreichen Begleitern, die jemals vom Boden oder vom Weltraum aus gemacht wurden. Anders gesagt: für 45 Prozent aller Sterne der Durchmusterung wurde bei einem Abstand von 0.5 Bogensekunden ein Helligkeitskontrast von 10 mag

Abb. II.2.5: Minimalabstand, in dem bei zehn ausgewählten Sternen ein Planet mit fünf Jupitermassen noch nachweisbar gewesen wäre.





erzielt. Abb. II.2.4b verdeutlicht die Abnahme des Kontrasts bei Sternen mit $7.5 > H > 6.5$ mag.

Diese technischen Eigenschaften konnten nun mit den erwähnten Modellen der Planetenspektren verglichen werden, um Aussagen über die Nachweisgrenze dieser Begleiter zu erzielen. Vereinfacht gesagt: Die Astronomen hätten einen eventuell vorhandenen Gasplaneten mit mindestens fünf Jupitermassen jenseits von 24 AE Abstand zum Stern oder mit mindestens zehn Jupitermassen jenseits von 9 AE entdecken müssen (Abb. II.2.5).

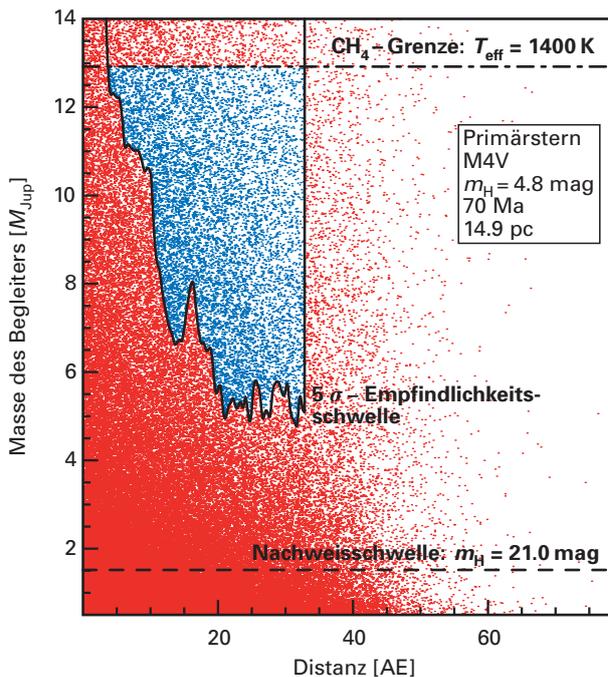


Abb. II.2.6: Planeten mit unterschiedlichen Massen, die in unterschiedlichen Mindestabständen vom Stern mit 50 Prozent Wahrscheinlichkeit nachweisbar gewesen wären.

Allerdings variiert der auf die Himmelsebene projizierte Abstand eines Planeten zu seinem Zentralstern mit seiner Position auf der Umlaufbahn. Nur zweimal pro Umlauf erreicht er den größten Winkelabstand zum Stern. Um diesen Effekt mit einzubeziehen, berechneten die Astronomen für jeden beobachteten Stern die Bewegung von 10 000 fiktiven Planeten, wobei sie deren Masse, die große Halbachse ihrer Bahn und deren Exzentrizität innerhalb gewisser Grenzen variierten. In Kombination mit den Kontrastkurven (Abb. II.2.4) ließ sich so für jeden Stern die Wahrscheinlichkeit für eine mögliche Entdeckung ermitteln.

Abb. II.2.6 zeigt jene Bereiche, in denen die Durchmusterung mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 50 Prozent einen Planeten mit entsprechender Masse und großer Bahnachse mit einer Signifikanz von $\pm 5\sigma$ hätte finden müssen. Man erkennt, dass die Durchmusterung für Planeten im Bereich von 4 bis 8 Jupitermassen und Bahnradien von 20 bis 40 AE besonders empfindlich ist. Junge Planeten mit mehr als 8 Jupitermassen sind nach der Theorie so heiß, dass sie in ihrem Spektrum keine starken Methanbanden aufweisen.

Abb. II.2.7: Zwei Beispiele für die nachweisbaren Planetenmassen (die den blauen Punkten entsprechenden Werte) in Abhängigkeit vom Abstand zum Zentralstern: links ein 50 Lichtjahre entfernter, 70 Millionen Jahre alter K1V-Stern; rechts ein 33.5 Lichtjahre entfernter, 12 Millionen Jahre alter M4V-Stern.

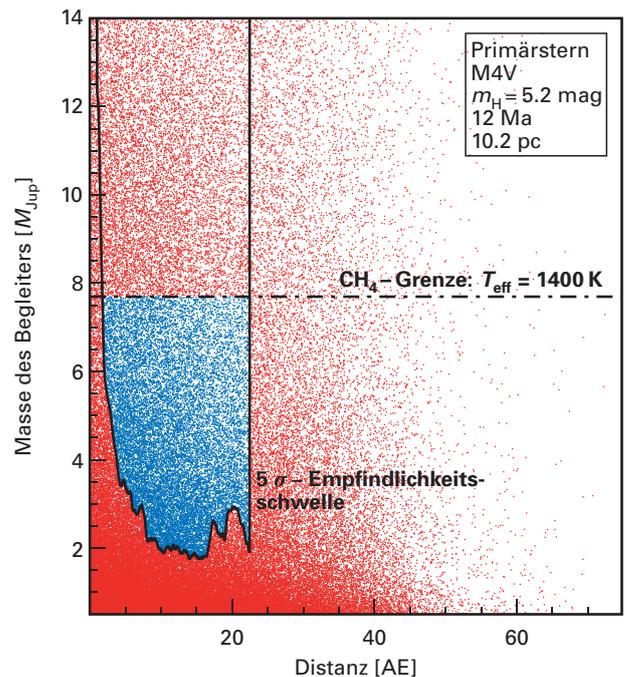


Abb. II.2.7 zeigt exemplarisch für zwei Sterne die minimal nachweisbare Planetenmasse in Abhängigkeit vom Abstand zum Stern. Für diese Diagramme wurden pro Stern eine Million Modellplaneten mit unterschiedlichen Massen, großen Halbachsen (von 0.02 bis 45 AE) und Exzentrizitäten simuliert. Bei der Verteilung der großen Halbachsen a wurde angenommen, dass deren Zahl N mit wachsendem Abstand konstant bleibt. Beliebige Phasen der Planeten auf ihrer Bahn und unterschiedliche Bahnneigungen wurden ebenfalls berücksichtigt. Planeten, die im Rahmen der NACO-SDI-Durchmusterung entdeckt worden wären, sind in blau, die anderen in rot dargestellt. Unter der Annahme, dass diese Sterne jeweils einen Planeten besitzen, ergeben sich die Entdeckungswahrscheinlichkeiten für die simulierten Planeten. So hätte man beispielsweise einen Planeten des 12 Millionen Jahre alten, 33.5 Lichtjahre entfernten Sterns GJ 799B mit mindestens zwei Jupitermassen im Abstand zwischen 10 und 20 AE mit 20 Prozent Wahrscheinlichkeit finden müssen.

Nimmt man diese Wahrscheinlichkeiten für alle beobachteten Sterne zusammen, so erhält man die Entdeckungswahrscheinlichkeit für diese Durchmusterung. Wie Abb. II.2.8 zeigt, hätten die Astronomen zwei bis drei Planeten finden müssen. Damit können sie mit sehr großer Wahrscheinlichkeit (93 %) ausschließen, dass die Riesenplaneten bis zu einem Abstand von 45 AE gleichmäßig über die großen Halbachsen verteilt sind.

Das Nullergebnis der SDI-Durchmusterung setzt damit erstmals Grenzen für die Abstandsverteilung junger, extrasolarer Riesenplaneten. Offenbar gibt es nicht viele Riesenplaneten in großen Entfernungen vom Stern. Eine statistische Analyse ergab, dass nicht mehr als 20 Prozent aller Sterne einen Planeten mit mehr als vier Jupitermassen in Entfernungen jenseits von 18 AE, entsprechend etwa der Umlaufbahn des Uranus, haben können. Diese Aussage gilt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 Prozent.

Die Ursache hierfür ist aber völlig offen. Entweder entstehen diese Gasriesen in solch großen Entfernungen nicht, oder sie wandern während ihrer Entstehungsphase bevorzugt näher an den Stern heran. Mit diesem auch

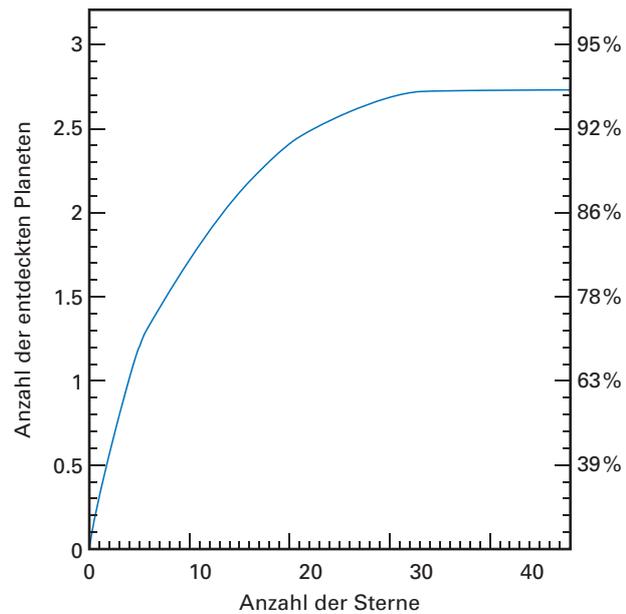


Abb. II.2.8: Kumulierte Anzahl von Planeten, die im NACO-SDI-Survey hätten nachgewiesen werden müssen, falls vorhanden. Diese Kurve ist von bestimmten Randbedingungen, wie einer gleichmäßigen Verteilung auf die großen Halbachsen abhängig.

Migration genannten Phänomen erklärt man die Existenz der »Heißen Jupiter«, also jener Gasplaneten, die ihren Stern auf engsten Bahnen, innerhalb von etwa 0.1 AE, umkreisen.

Wolfgang Brandner, Rainer Lenzen, Thomas Henning
In Zusammenarbeit mit:
Steward Observatory, Tucson (USA),
Observatorio Astrofisico di Arcetri, Florenz,
European Southern Observatory, Chile,
Universidad de Chile, Santiago,
W. M. Keck Observatory, Hawaii,
Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics,
Cambridge (USA)

II.3 Die schnelle Entstehung von Planetesimalen in turbulenten Scheiben

In den ersten Phasen der Entstehung von Planeten stoßen Staubteilchen zusammen, bleiben aneinander haften und wachsen. Hat ein Körper einen Durchmesser von etwa einen Kilometer erreicht, so ist seine Gravitationskraft groß genug, um weitere Körper aus der Umgebung anzuziehen und an sich zu binden. Auf diese Weise wächst er schließlich zu einem Planeten heran. Doch dieses einfache Szenario scheint bei Größen um zehn Zentimeter eine Grenze zu besitzen. Gesteinsbrocken dieser Größe stürzen sehr schnell in den Zentralstern ab, und sie können jüngsten Ergebnissen der Laborastrophysik zufolge nicht weiter mit dem klassischen Stoßen-Haften-Mechanismus wachsen, weil sie sich bei gegenseitigen Stößen eher gegenseitig zerstören. Theoretiker des MPIA haben nun einen Weg gefunden, wie die Natur diese Zehnzentimeter-Barriere überwinden könnte: In den protoplanetaren Scheiben entstehen durch Turbulenzen »Hochdruckwirbel«. Darin sammeln sich Gesteinsbrocken und können sich nun aufgrund der gemeinsamen Schwerkraft zusammenlagern. Auf diese Weise können in kurzer Zeit Körper von der Größe unseres Kleinplaneten Ceres entstehen.

Kleinste Staubpartikel bleiben bei gegenseitigen Stößen aneinander haften, weil zwischen ihnen die anziehende Van-der-Waals-Kraft wirkt. Die hierfür nötigen Relativgeschwindigkeiten erhalten sie durch die Brownsche Bewegung. Sie nimmt mit wachsender Teilchenmasse ab und kann deshalb nur in der sehr jungen protoplanetaren Wolke einen Einfluss haben. 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 hierbei zwischen den Staubpartikeln Relativgeschwindigkeiten auf, die zu weiteren Zusammenstößen und einem Anwachsen führen. So werden die Teilchen beim Erreichen der Scheibenebene vermutlich bis zu einige Zentimeter groß.

In der Mittelebene der Scheibe ist die Staubbichte verhältnismäßig hoch, so dass Teilchen jetzt öfter zusammenstoßen und prinzipiell zu Planetesimalen mit einigen Kilometern Durchmesser anwachsen könnten. Dieses verhindern jedoch im Wesentlichen zwei Prozesse. Erstens prallen die Staubkrümel ab einer gewissen Geschwindigkeit voneinander ab oder zerstören sich sogar gegenseitig. Jüngste Ergebnisse der Laborastrophysik belegen, dass die Gesteinsbrocken durch den Stoßen-Haften-Mechanismus kaum über mehr als etwa zehn Zentimeter hinaus wachsen können.

Und zweitens verlieren Körper dieser Größenordnung aufgrund ihrer Reibung mit dem Gas in der Scheibe an Drehimpuls und nähern sich auf einer spiralförmigen Bahn in relativ kurzer Zeit dem Zentralstern. Abschätzungen zeigen, dass ein Brocken dieser Größe innerhalb von einigen hundert Jahren dem Stern so nahe kommt, dass er verdampft. In diesem kurzen Zeitraum kann ein Stein von der Größe eines Tennisballs nicht um etwa zwei Größenordnungen im Durchmesser, das heißt um sechs Größenordnungen in der Masse wachsen.

Turbulenz konzentriert Gesteinsbrocken

Die hohen Driftraten der Felsbrocken treten in Scheiben auf, in denen Gas und Staub laminar strömen. Es gibt aber bereits seit einiger Zeit die Vermutung, dass Turbulenzen auftreten, die die Bewegung der Partikel erheblich beeinflussen. In erster Linie ist das die Kelvin-Helmholtz-Turbulenz (kurz KH-Turbulenz), die auf folgende Weise entsteht: Zunächst sedimentiert der Staub zur Mittelebene der Scheibe. Dort sinken Temperatur und Dichte mit wachsendem Abstand vom Zentralstern. Aus diesem Grunde herrscht ein radialer Druckgradient, was dazu führt, dass das Gas langsamer rotiert, als es dies auf einer reinen Keplerbahn tun würde. Die Staubteilchen hingegen reagieren nicht auf den Druckgradienten, sondern »fühlen« nur die Schwerkraft. Sie umlaufen den Zentralstern deshalb auf Keplerbahnen. Ist in der Mittelebene der Scheibe das Staub-zu-Gas-Verhältnis hoch genug, so reißt der Staub die Gasteilchen mit und zwingt sie ebenfalls auf die Geschwindigkeit einer Keplerbahn. Als Folge hiervon bewegt sich das Gas in der Mittelebene schneller als Gas ober- und unterhalb davon. Es tritt also eine vertikale Geschwindigkeitsscherung auf, welche die KH-Instabilitäten auslöst.

Die hierbei einsetzende turbulente Gasbewegung wirbelt den Staub in der Mittelebene auf und verhindert dadurch eine Verklumpung des Staubes zu Planetesimalen. Dieses Problem erkannten P. Goldreich und W. R. Ward schon 1973 und sahen darin ein Hindernis für das Anwachsen der Staubteilchen zu Planetesimalen.

Erst vor wenigen Jahren tauchte dann die Vermutung auf, dass die Turbulenzen lokal Bereiche mit erhöhter Gasdichte entstehen lassen, in denen sich feste Partikel ansammeln können. Anders Johansen, Hubert Klahr und Thomas Henning gingen diesem Phänomen im Jahre 2006 mit umfangreichen Computersimulationen nach und konnten es bestätigen (s. Jahresbericht 2006, Kap. III.2). Können diese Hochdruckwirbel die Geburtsstätten der Planetesimale sein?

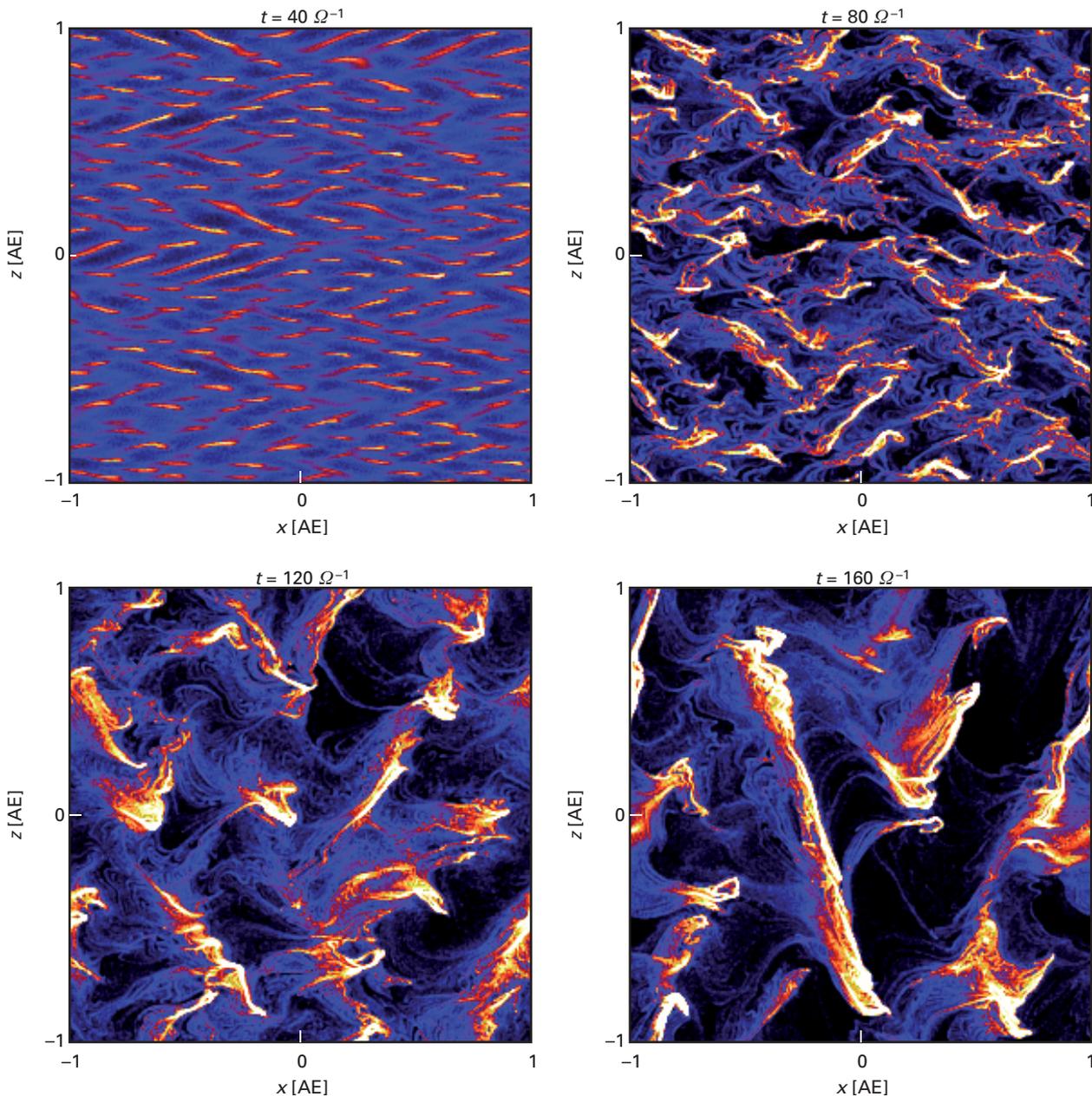


Abb. II.3.1: Entwicklung der Teilchendichte in einer Scheibe mit stark ans Gas gekoppelten (kleinen) Teilchen und einem geringen Staub-zu-Gas-Verhältnis von 0.2. Man erkennt, wie die

Verdichtungen anwachsen und sich teilweise nahezu senkrecht zur Scheibenebene ausdehnen. Ω ist die Keplerfrequenz bei gegebenem Abstand r vom Stern.

In mehreren zweidimensionalen Modellläufen mit jeweils 1.6 Millionen Teilchen und bei unterschiedlicher räumlicher Auflösung gingen die Theoretiker dieser Frage nach. Dabei variierten sie mehrere physikalische Parameter, wie etwa das Verhältnis von Staub zu Gas. Außerdem berücksichtigten sie, dass die Staubteilchen an das Gas gekoppelt sind, so dass Reibung auftritt. Wie stark die Kopplung ist, hängt von der Größe der Teilchen ab: Große Teilchen koppeln schwächer an das Gas als kleine. In den Modellen wurde mit zwei

Kopplungsstärken gerechnet, die Teilchendurchmesser von 20 cm und 100 cm repräsentierten.

Die Modellläufe zeigten deutlich, wie sich in der Scheibenströmung rasch Turbulenzen ausbildeten, die über mehrere Umläufe hinweg stabil bleiben. Es entstehen Filamente mit erhöhter Teilchendichte. Da diese vornehmlich vertikal ausgerichtet sind, können sie bei ihren Umläufen leicht weitere Teilchen aufnehmen und wachsen (Abb. II.3.1). Der für die Dynamik entscheidende Punkt besteht darin, dass die Teilchen im Innern einer

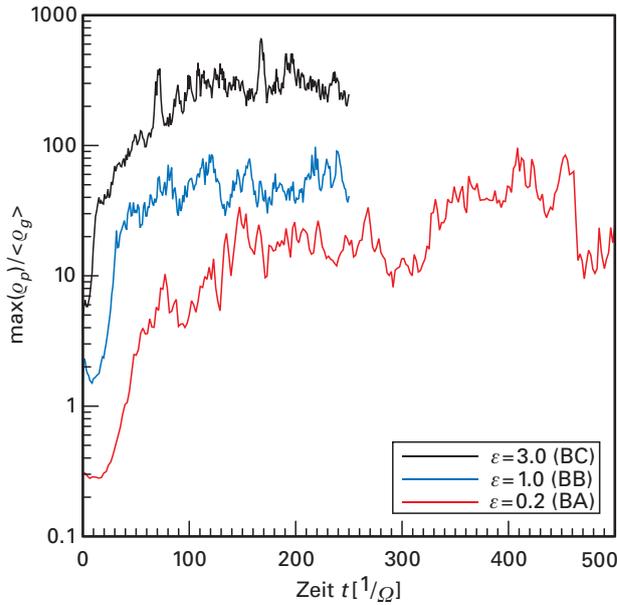
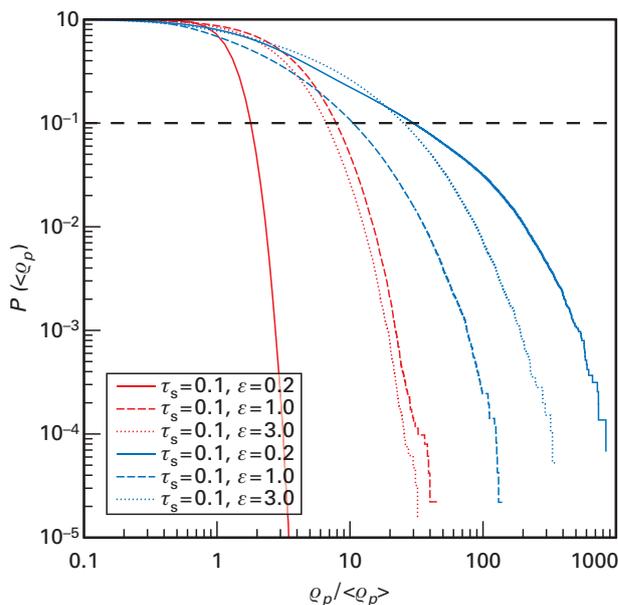


Abb. II.3.2: Entwicklung der maximalen Teilchendichte in Einheiten der mittleren Gasdichte. Gezeigt sind die Ergebnisse für drei Modelle mit unterschiedlichem Staub-zu-Gas-Verhältnis ϵ .

solchen Ansammlung nicht mehr dem »Gegenwind« des Gases ausgesetzt sind. Die Gesamtreibung für eine Teilchengruppe ist somit geringer, als sie für alle Teilchen zusammen als »Einzelgänger« wäre. Deshalb driftet eine solche Gruppe nicht so schnell zum Stern.

Abb. II.3.3: Kumulative Verteilung der Teilchendichte für alle sechs Modelle mit unterschiedlicher Kopplungsstärke τ und Staub-zu-Gas-Verhältnis ϵ .

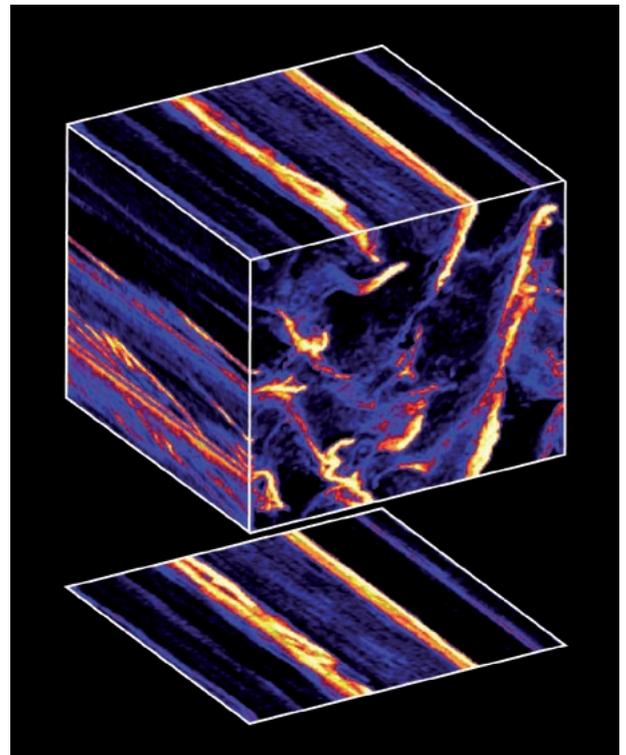


Hierbei ist zu betonen, dass die Eigengravitation des Teilchenensembles nicht berücksichtigt wurde. Es handelt sich um einen rein dynamischen, sich selbst verstärkenden Effekt, bei dem die Teilchen wie in einem Stau eingefangen werden. Abb. II.3.2 zeigt, wie in den schwach gekoppelten Modellen (also für große Teilchen) die Dichte in einigen Turbulenzzellen anstieg. Der Parameter ϵ gibt das Verhältnis der Masse aller Staubpartikel zur Masse des Gases innerhalb eines Gebietes an. Die Maximaldichte erreicht in allen drei Fällen etwa den hundertfachen Wert der Anzahldichte der Einzelteilchen am Anfang der Simulation.

War das Staub-zu-Gas-Verhältnis klein und lag eine starke Kopplung vor (kleine Teilchen), so war der Effekt geringer: Der Dichteanstieg war nur mäßig und die Staubklumpen blieben kleiner und kurzlebiger. Im Extremfall stieg die Dichte um lediglich etwa 20 Prozent. Alle kumulativ erreichten Überdichten zeigt Abb. II.3.3.

Mit erhöhtem Rechenaufwand und 20 Millionen Teilchen konnte Anders Johansen zwei Fälle auch dreidimensional rechnen, wobei er sich auf ein würfelförmiges Volumen in der Scheibe beschränkte. In dem Fall kleiner Teilchen und eines geringen Staub-zu-Gas-Verhältnisses (entsprechend Abb. II.3.1) erkennt man deutlich, wie die Staubfilamente in die Länge gezogen werden (Abb. II.3.4).

Abb. II.3.4: Dreidimensionale Entwicklung der Teilchendichte in dem Fall, der in Abb. II.3.1 für zwei Dimensionen gezeigt ist.



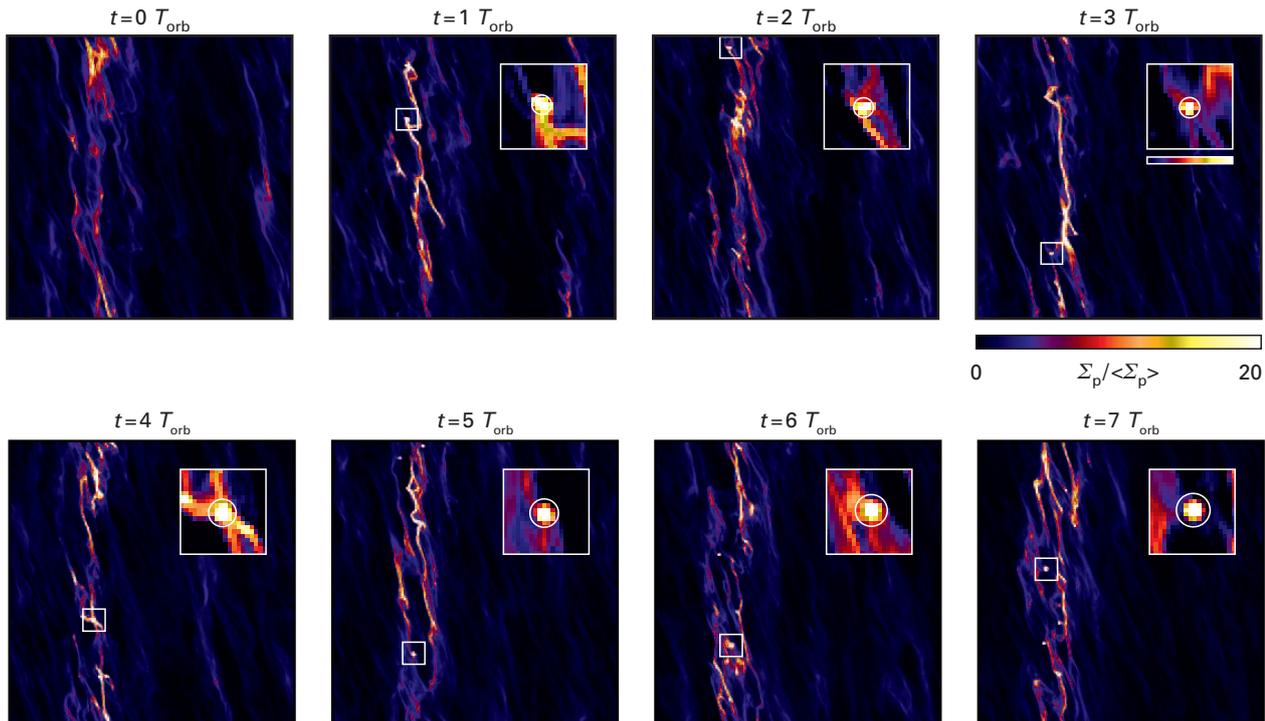


Abb. II.3.5: Entwicklung der Teilchendichte in der Scheibe unter Berücksichtigung der Magnetrotation und der Eigengravitation der Gesteinsbrocken in den Turbulenzelementen. *V. l. n. r.* sind Schnappschüsse nach jeweils einem Umlauf gezeigt, in dem kleinen Kasten ist das Anwachsen der größten Gesteinsansammlung erkennbar.

Eine genaue Zeitanalyse der Simulationen lässt vermuten, dass es sich bei den Verdichtungen um ein dynamisches, kollektives Phänomen handelt, nicht jedoch um eine dauerhafte Dichteerhöhung. Es bilden sich demnach in der Scheibe eher lockere »Sandhaufen«, die sich irgendwann wieder auflösen, als große Felsbrocken. Doch dieses Phänomen kann auch damit zu tun haben, dass in den Modellen die Eigengravitation der Verdichtungen nicht mit einbezogen wurde. Diesem zusätzlichen Phänomen gingen die Theoretiker in einer zweiten Arbeit nach, in die sie darüber hinaus die Wirkung von Magnetfeldern mit einbezogen. Die hierbei auftretende Magnetrotations-Turbulenz (MRI-Turbulenz) verstärkt die Turbulenzen noch und fördert die Entstehung von Planetesimalen.

Magnetfelder unterstützen die Planetesimalentstehung

Die MRI-Turbulenz ist ein Zusammenspiel aus Scherströmungen und Magnetfeldern, das man sich etwa wie folgt vorstellen kann. In den protoplanetaren Scheiben strömt das Gas dicht am Stern schneller als in größerer Entfernung. Experimente und analytische Untersuchungen haben gezeigt, dass diese ansonsten schnell instabil werdenden Scherströmungen in Scheiben nicht so leicht turbulent werden, weil die Scheibe mit hoher Geschwindigkeit um den Stern rotiert: Der hohe Drehimpuls der Rotation stabilisiert die Scherströmung.

Nahe am jungen Stern ist nun das Gas wahrscheinlich ionisiert, und die Ladungsträger koppeln an magnetische Feldlinien. Wie Gummibänder durchziehen die

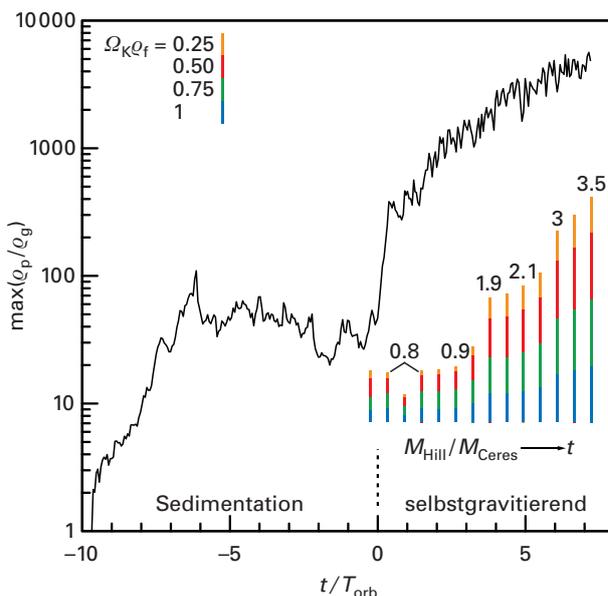
se die Scheibe und versuchen, die Scherung zu verhindern. So wird der innere Bereich der Scheibe gebremst und der äußere Bereich beschleunigt. Dies destabilisiert die Strömung in der Scheibe allerdings so stark, dass sie turbulent werden muss – es entstehen Wirbel. Die Magnetfelder wirken also ähnlich wie eine Antenne auf dem Dach eines stromlinienförmigen Sportwagens: Der Luftwiderstand wird erhöht, und die Strömung wird turbulent.

Bisherige Simulationen der Theoriegruppe am MPIA konnten bereits belegen, dass die MRI-Turbulenz die Konzentration von größeren Körpern in Hochdruckwirbeln verstärkt. Jetzt bezogen die Theoretiker zusätzlich die Eigengravitation zwischen den Teilchen mit ein. Dies war erst möglich, nachdem Johansen das Simulationsprogramm weiterentwickelt hatte. Es löst die magneto-hydrodynamischen Gleichungen auf dem Gitter für ein Gas, das wesentlich mit kleineren Teilchen wechselwirken kann. Für die Entwicklung eines hierfür notwendigen Parallel-Solvers wurde Johansen mit dem Ernst-Patzer-Preis 2007 ausgezeichnet (siehe Kap. V.5). Erst dank dieser Neuentwicklung gelang es, das gravitative Zusammenwachsen der Staubbrocken quantitativ zu erfassen.

In den Simulationen wurde erneut ein würfelförmiges Volumen in der protoplanetaren Scheibe in etwa 5 AE Entfernung vom Stern gewählt, das den jungen Stern in fester Distanz umkreist. Die Gasteilchen kreisen auf Bahnen mit subkeplerscher Geschwindigkeit, während sich die Staubteilchen mit keplerscher Geschwindigkeit um den Stern bewegen. Dadurch erfahren diese einen starken Gegenwind und driften auf den Stern zu. Außerdem spüren die Teilchen einen Gaswiderstand, während sie zur Mittelebene absinken.

Die MRI-Turbulenz erzeugt in dem Gas Wirbel mit einer leicht erhöhten 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. Bezieht man nun die Rückreaktion der festen Körper, deren Kopplungsgrade vier unterschiedlichen Durchmessern zwischen 30 und 120 cm entsprechen, auf die Gasteilchen ein, so geschieht Folgendes: Die mit subkeplerscher Geschwindigkeit laufenden Gasteilchen werden von den Gesteinsbrocken mitgerissen und bewegen sich nun ebenfalls fast mit keplerscher Geschwindigkeit. Dadurch verringert sich der Gegenwind für die Gesteinsbrocken. Dann bewegen sich die Gesteinsbrocken in die bereits vorhandenen Überdichtegebiete und sammeln sich dort an. Die Zusammenstöße zwischen den Brocken innerhalb dieser Bereiche führen zu einer dynamischen Kühlung des Ensembles und damit zu einer weiteren Verdichtung.

Abb. II.3.6: Anwachsen einer Gesteinsagglomeration. Reibungskraft und vertikale Gravitation in der Scheibe wurden ab $t = -10$ berücksichtigt, während Eigengravitation und Kühlung durch Stöße der Gesteinsbrocken untereinander erst bei $t = 0$ »angeschaltet« wurden. Man erkennt das rasante Anwachsen des Gesteinsensembles bis zu 3.5 Ceres-Massen.



Allerdings mussten hierbei in der Modellrechnung Materialeigenschaften wie Koagulation oder gegenseitige Zerstörung unberücksichtigt bleiben.

Entscheidend tritt dann aber die Gravitation in Kraft: Sie bewirkt eine Verdichtung des Ensembles. Abb. II.3.5 zeigt das ausgewählte Volumen über insgesamt sieben Umläufe hinweg. Man erkennt, wie eine anfänglich relative kleine Ansammlung von Gesteinsbrocken immer mehr Material aufammelt und dabei stark anwächst. Der größte Klumpen ist in jedem Bild rechts vergrößert dargestellt. Er hatte am Ende der Simulation eine Masse erreicht, die dem 3.5-fachen des Kleinplaneten Ceres entspricht (Abb. II.3.6).

Ist das nun die Lösung des Rätsels, wie die kleinen Steinchen in der protoplanetaren Scheibe ihrem Schicksal des Verdampfens im Stern entgehen und die Zentimeterbarriere überwinden? Vieles spricht dafür, auch wenn noch Fragen offen sind. So kann ein Magnetfeld die Turbulenzen nur dann verstärken, wenn die Materie in der Scheibe ionisiert ist. Speziell in den Außenbereichen der protoplanetaren Scheiben dürfte es aber so kalt sein, dass das Gas nicht ionisiert ist.

Dennoch sind die bisherigen Fortschritte sehr überzeugend. Zum ersten Mal scheint es möglich zu sein, das Wachstum vom Mikrometergroßen Staubteilchen bis zum Planeten durchgehend zu erklären.

Als nächstes wollen die Theoretiker die Hochdruckgebiete in der MRI besser verstehen lernen. So entstehen in größeren Simulationskästen sehr starke Zonalströmungen entlang der Rotationsrichtung der Scheibe, zwischen denen sich langlebige Hochdruckgebiete ausbilden. Ähnliche Strömungen treten auch in der Sonne und in Planeten wie Jupiter auf: Die Bänder in Jupiters Atmosphäre sind solche Gebiete mit verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten. Möglicherweise werden Gesteinsbrocken in protoplanetaren Scheiben in solchen Zonalströmungen eingefangen. Außerdem scheint es denkbar, dass auch kleinere Partikel zwischen solchen Zonalströmungen konzentriert werden und dort zu einen bis fünf Zentimeter großen Körnern anwachsen.

Gleichzeitig versuchen Johansen und Kollegen, mit ihren Modellrechnungen die Größenverteilung von Planetesimalmassen zu bestimmen, ähnlich wie man in der Sternentstehung die »Initial Mass Function« bestimmt. Dafür müssen die Simulationen länger laufen.

Filme der Computersimulationen finden sich unter: www.strw.leidenuniv.nl/~ajohan/research.php

*Anders Johansen, Hubert Klahr, Thomas Henning.
In Zusammenarbeit mit:
Princeton University Observatory, Princeton; American
Museum of Natural History, New York;
University of Virginia, Charlottesville;
University of Toronto, Kanada*

II.4 Erstes kalibriertes Spektrum eines extrasolaren Planeten

Nach dem indirekten Nachweis eines extrasolaren Planeten im Jahre 1995 tauchte bei den Astronomen umgehend der Wunsch auf, weitere dieser Himmelskörper zu entdecken und diese dann spektroskopisch zu untersuchen, um so die Zusammensetzung ihrer Atmosphären zu ermitteln. Wegen des enormen Helligkeitskontrastes zwischen Stern und Planet und ihres sehr geringen gegenseitigen Abstandes ist dieses Unterfangen jedoch extrem schwierig und liegt in fast allen Fällen jenseits des technisch Möglichen. Einem Astronomenteam um Mark Swain vom Jet Propulsion Laboratory und Jeroen Bouwman vom MPIA ist es nun gelungen, von dem Exoplaneten HD 209458b ein Spektrum im mittleren Infrarot zu gewinnen. Es ist das erste Spektrum eines Planeten überhaupt, das den Strahlungsfluss in absoluten Einheiten liefert. Diese Daten lassen bereits einige vorsichtige Schlüsse über die Atmosphäre dieses »Heißen Jupiter« zu.

Da die Bilder des Sterns und seines Planeten praktisch zusammenfallen, überlagern sich auch deren Spektren. Man muss sie mit Hilfe trickreicher Techniken voneinander trennen, um Informationen über den Planeten zu erhalten. Hierfür gibt es drei Methoden, die alle nur bei sogenannten Transitplaneten anwendbar sind. Das sind

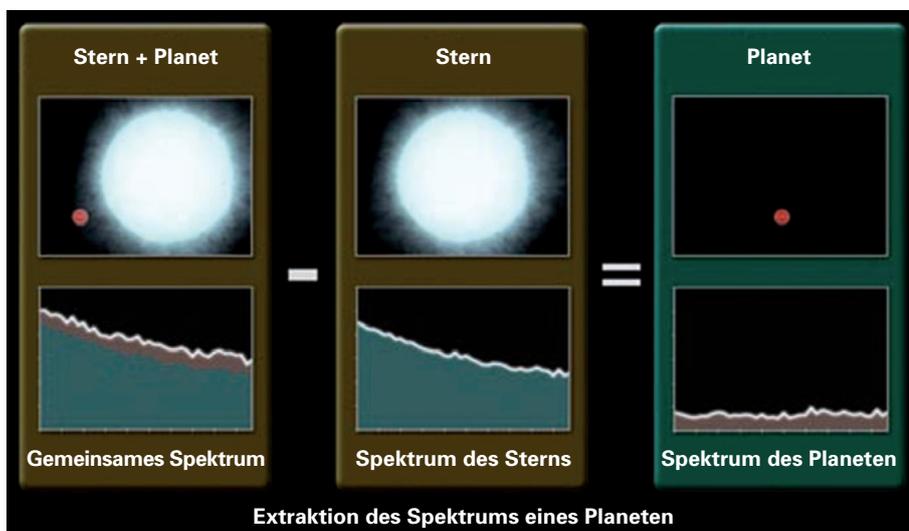
Abb. II.4.1: Schema der Methode der sekundären Bedeckung. Man nimmt Spektren auf, während der Planet auf dem Weg zum hinteren Transit ist und seine heiße Seite der Erde zukehrt. Diese Spektren enthalten das Licht von (Stern + Planet). Dann nimmt man ein reines Sternspektrum auf, während sich der Planet hinter dem Stern befindet. Die Differenz der beiden Spektren liefert das Planetenspektrum. (Grafik: NASA)

Systeme, bei denen wir zufällig genau auf die Kante der Bahnebene schauen, so dass der Planet bei jedem Umlauf von der Erde aus gesehen vor dem Stern vorbeizieht und später hinter ihm verschwindet. Diese Geometrie ermöglicht drei Beobachtungsmoden.

Spektroskopische Methoden für Exoplaneten

Erstens die *Reflexionsmethode*: Ein Planet oder dessen Atmosphäre reflektiert das Sternenlicht. Ein Teleskop empfängt also sowohl das direkte Licht des Sterns als auch das vom Planeten reflektierte Licht. Wenn der Planet hinter dem Stern verschwindet, empfängt es nur noch das Sternenlicht. Zieht man nun im Computer vom Spektrum von Stern plus Planet das reine Sternenspektrum ab, so erhält man das Planetenspektrum. Dieses kann Absorptionslinien von Elementen der Planetenatmosphäre enthalten. Alle bisherigen Versuche dieser Art haben jedoch keine eindeutigen Ergebnisse geliefert.

Zweitens die *Transmissionsmethode*: Wenn der Planet vor dem Stern vorbeizieht, durchquert ein Teil des Sternenlichts die Atmosphäre des Planeten. Es enthält deshalb spektroskopische Informationen über die chemische Zusammensetzung seiner Gashülle. Um diese aus dem Gesamtspektrum zu extrahieren, nimmt man zwei Serien von Spektren auf: die eine kurz vor dem Vorbeizug des Planeten vor dem Stern (der primären Bedeckung) – sie enthält die Sternstrahlung sowie mögliche thermische Emission von der Nachtseite des Planeten; die zweite Serie nimmt man während der Transitphase auf. Bildet man die Differenz dieser beiden Spektren, so können Absorptionslinien von Elemen-



ten in der Planetenatmosphäre auftreten. Auf diese Weise gelang es zwei amerikanischen Astronomen, in der Atmosphäre des Exoplaneten HD 189733b Natrium sowie Wasser und Methan nachzuweisen. Die Tiefe der Natriumabsorptionslinie betrug nur 0.7 Promille des benachbarten Kontinuums.

Drittens die *Methode der thermischen Emission oder der sekundären Bedeckung* (Abb. II.4.1): Ein Planet, der seinen Stern in sehr geringem Abstand umkreist, wird stark erhitzt und emittiert deshalb thermische Strahlung im Infraroten. Um diese zu identifizieren, nimmt man zum einen Spektren auf, während der Planet auf dem Weg zum hinteren Transit ist und seine heiße Seite der Erde zukehrt: Diese Spektren enthalten das Licht von Stern plus Planet. Dann nimmt man reine Sternspektren auf, während sich der Planet hinter dem Stern befindet. Die Differenz der beiden Sätze von Spektren liefert das Planetenspektrum.

Ergebnisse für den Exoplaneten HD 209458b

Diese Methode der sekundären Bedeckung wandte auch das Team um Swain und Bouwman an. Dazu hatte es den 153 Lichtjahre entfernten Stern HD 209458 vom Typ G0 ausgewählt, bei dem schon im Jahre 2000 ein Transitplanet entdeckt worden war. Langjährige Beobachtungen hatten zu einer sehr genauen Bestimmung der Bahnparameter geführt: Der Planet umkreist seinen Zentralstern innerhalb von 3.525 Tagen in einem Abstand von 0.0474 Astronomischen Einheiten. Auch die Zeitpunkte der einzelnen Phasen, insbesondere der Bedeckungen, sind sehr genau bekannt, und das ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung dieser Beobachtungsmethode. Die Masse des Planeten beträgt 0.64 Jupitermassen und sein Radius 1.32 Jupiterradien. Damit ergibt sich seine mittlere Dichte zu nur 0.31 g/cm^3 .

Wegen seiner Nähe zum Zentralstern herrschen auf dem Exoplaneten Temperaturen von mehr als 1000 Kelvin und seine Atmosphäre strahlt dementsprechend im thermischen Infrarot. Die Astronomen beobachteten HD 209458 mit dem Infrarotspektrographen an Bord des Weltraumteleskops SPITZER der NASA in einem Wellenlängenbereich von $7.5 \mu\text{m}$ bis $15.2 \mu\text{m}$. Dabei nahmen sie in fünf unterschiedlichen Phasen des Planeten insgesamt 700 Spektren mit einer Belichtungszeit von jeweils einer Minute auf. Vor Abzug des reinen Sternspektrums von dem Gesamtspektrum (Stern plus Planet) war eine aufwendige Analyse des Datensatzes nötig, bei der systematische Fehler eliminiert werden mussten. Von der Qualität dieser Datenanalyse hängt es ab, ob das schließlich verbleibende Planetenspektrum auch wirklich vertrauenswürdig ist und echte spektrale Merkmale erkennen lässt.

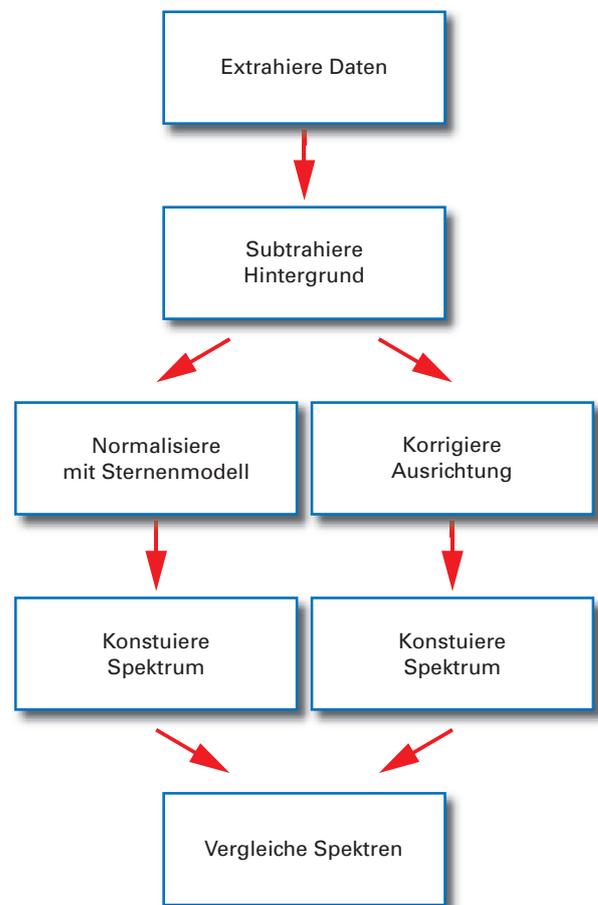
Die Astronomen identifizierten vier dominante Fehlerquellen, die insgesamt ein rund zehnmal so starkes Signal erzeugen wie der erwartete Fluss des Plane-

tenkontinuums. Zu den Störeffekten zählen insbesondere Intensitätssprünge zwischen den Beobachtungen, periodische Flussmodulationen und eine stetige Drift des Signals während der Beobachtungen. Allerdings traten diese Störeffekte nicht zufällig auf, sondern waren zeitlich korreliert und ließen sich konkreten technischen Unzulänglichkeiten zuordnen. Sie haben ihre Ursache in einem fehlerhaften Pointing des Teleskops, einer unzureichenden Subtraktion des Infrarothintergrundes und einem Ansammeln von Ladungen im Detektor.

In einer aufwendigen Prozedur wandten die Astronomen mehrere Kalibrationsverfahren an, um diese Fehler so weit wie möglich zu eliminieren. Es wurden zwei voneinander unabhängige Verfahren angewandt, die die systematischen Fehler auf unterschiedliche Weise behandeln. Das eine Verfahren liefert nach mehreren Schritten ein differentielles Spektrum in beliebigen Einheiten, während das andere ein absolut kalibriertes Spektrum ergibt. Der Vergleich dieser Spektren ist somit ein Maß für die Qualität der Kalibrationsverfahren. Abb. II.4.2 zeigt schematisch die einzelnen Schritte.

Abb. II.4.3 zeigt die Lichtkurve von HD 209458, integriert über den gesamten Wellenlängenbereich, in

Abb. II.4.2: Schema der beiden voneinander unabhängigen Kalibrationsverfahren.



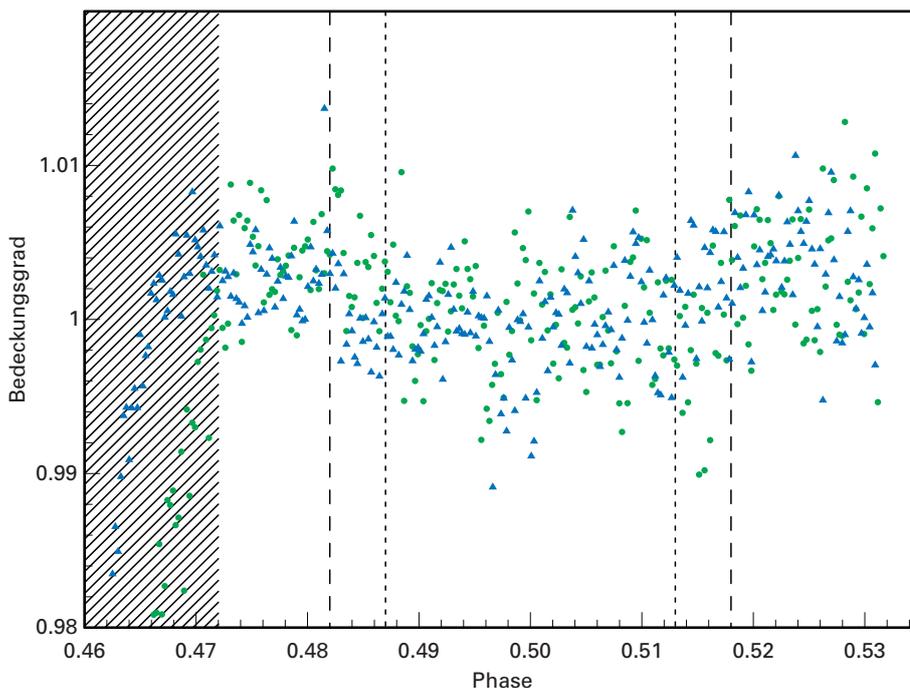
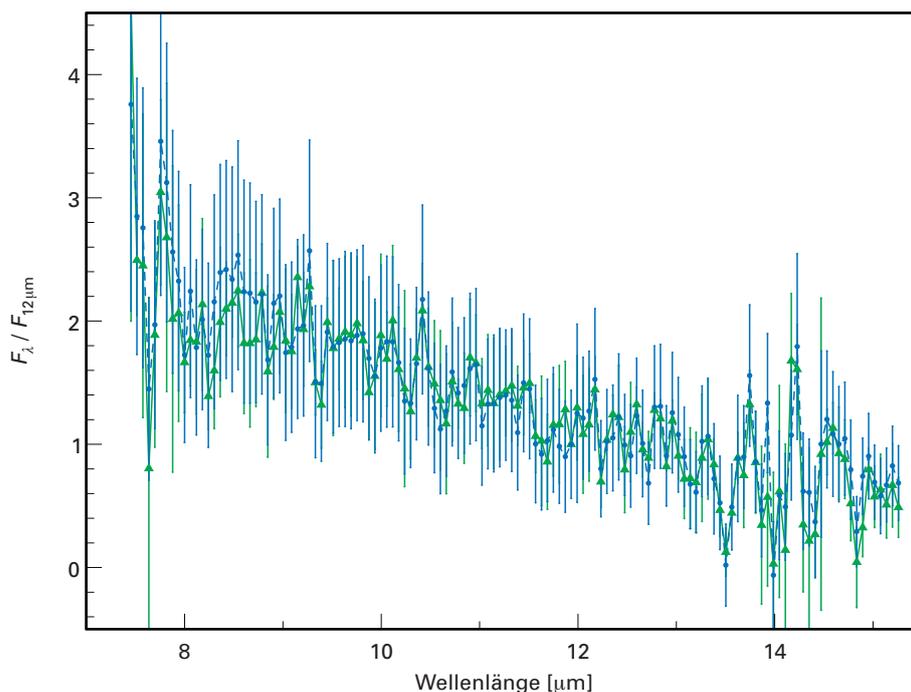


Abb. II.4.3: Lichtkurve von HD 2095458, integriert über den gesamten Wellenlängenbereich, in Abhängigkeit von der Phase des Planeten auf seiner Umlaufbahn.

Abhängigkeit von der Phase des Planeten auf seiner Umlaufbahn. Die Helligkeitsabnahme während der Planet hinter dem Stern verschwindet (sekundäre Bedeckung) ist bei der Phase um 0.5 herum erkennbar. Die Absenkung im Kontinuum beträgt hier nur 3.1 Promille.

Abb. II.4.4: Die beiden unabhängig voneinander gewonnenen Planetenspektren, normiert auf den mittleren Fluss bei 12 μm Wellenlänge. Das absolute Spektrum (blaue gefüllte Kreise) und das relative Spektrum (grüne Dreiecke) stimmen sehr gut überein.

Die beiden unabhängig voneinander gewonnenen Planetenspektren zeigt Abb. II.4.4. Die Messwerte (grüne Dreiecke für das relative Spektrum, blaue Punkte für das absolute Spektrum) stimmen sehr gut überein, was



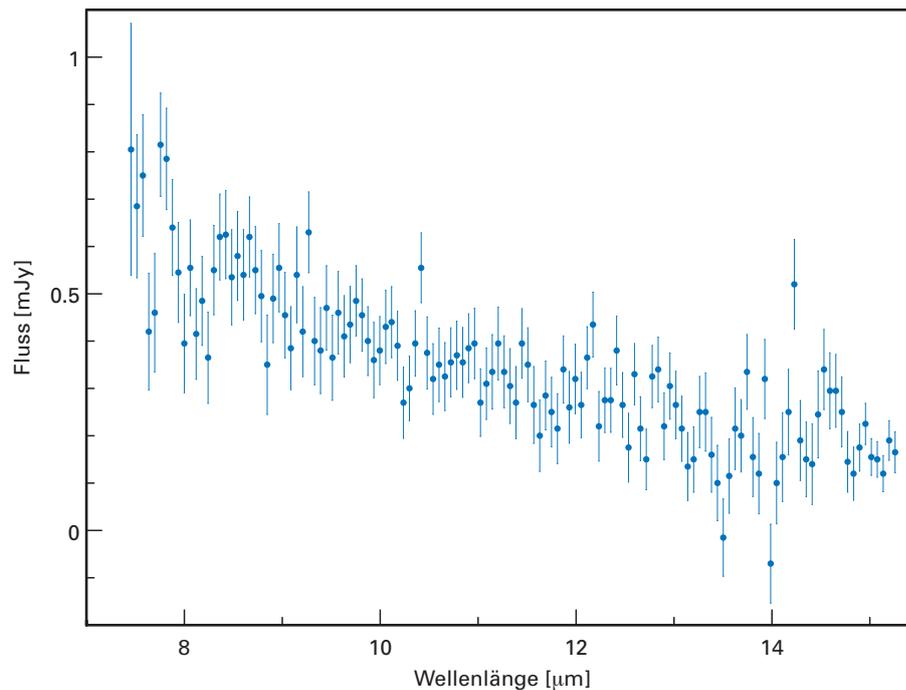


Abb. II.4.5: Das absolute Spektrum des Exoplaneten HD 2095458b. Es erscheint weitgehend wie ein Kontinuum, wobei zwischen 7.5 und 8.5 μm Wellenlänge Emissionslinien angedeutet sind.

das Vertrauen in die Kalibrationsverfahren stärkt. Auf diese Weise war es den Astronomen gelungen, erstmals von einem Exoplaneten ein absolutes Spektrum zu erhalten. Mit einer Genauigkeit der Flusskalibration von 0.1 % sollte sich mit dieser Methode zukünftig sogar thermische Emission von der Nachtseite des Planeten messen lassen. Wie Abb. II.4.5 zeigt, überdeckt es einen Flussbereich von 0.2 bis 0.6 mJy. Welche Schlüsse lassen sich nun aus diesem Spektrum über die Atmosphäre des Planeten ziehen?

Ein Vergleich mit Modellspektren (Abb. II.4.6) ermöglicht einige vorsichtige Aussagen. Das Kontinuum passt zu einer 1100 K heißen Atmosphäre. Eine signifikante Abweichung des Kontinuums zwischen 7.5 und 8.5 μm lässt sich damit erklären, dass in der Atmosphäre eine erhebliche Menge an Wärme von der Tag- auf die Nachtseite transportiert wird. Mit einer statistischen Signifikanz von 4σ erscheint zudem bei 8.1 μm Wellenlänge eine schmale Struktur. Allerdings lässt sich nicht eindeutig entscheiden, ob es sich um eine Emission oder Absorption handelt. Auch bei 7.7 μm Wellenlänge könnte eine Emissions- oder Absorptionslinie vorliegen.

Überraschend war die Tatsache, dass sich – im Gegensatz zu dem »heißen Jupiter« HD189733b – keine Hinweise auf Wasser im Spektrum fanden. Die Ursache hierfür ist noch unklar. Die stärksten Wasser-Emissionsbanden erwarten die Forscher aber im na-

hen Infrarot, wo sie sich mit SPITZER nachweisen lassen sollten. In der Umgebung der mutmaßlichen H_2O -Linien könnten zudem Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO_2) nachweisbar sein. Auch Transmissionsspektren könnten in der Frage nach dem fehlenden Wasser weiterführen.

Etwa gleichzeitig mit der Arbeit von Swain, Bouwman und Kollegen erschien eine Veröffentlichung einer Gruppe um Jeremy Richardson vom Goddard Space Flight Center der NASA, die HD 2095458 ebenfalls mit SPITZER beobachtet hatte. Auch diese Gruppe fand die breite Modulation zwischen 7.5 und 8.5 μm . Allerdings behauptete sie, zudem eine breite Emissionslinie um 9.65 μm gefunden zu haben, die sie auf Silikate zurückführte. Dies konnte das Team um Swain und Bouwman nicht bestätigen.

Mit dieser ersten Messung eines absolut kalibrierten Spektrums eines Exoplaneten sind die Astronomen einen wichtigen Schritt voran gekommen. Der Erfolg hat das Vertrauen in die Methode gestärkt, so dass Bouwman und Kollegen nun weitere Emissionsspektren anderer Transit-Planeten messen wollen, und dann über den gesamten Umlauf des Planeten. Auf diese Weise erhält man die chemische Zusammensetzung der Planetenatmosphären unter verschiedenen Phasenwinkeln, woraus sich Schlüsse auf die chemischen Prozesse von der Tag- zur Nachtseite ziehen lassen. Vorgänge wie Photochemie und Wärmeverteilung könnten so erstmals zugänglich werden. Die Gruppe hat deswegen bereits Beobachtungsanträge für SPITZER und für das Weltraumteleskop HUBBLE eingereicht. Auch Beobachtungen mit bodengebundenen Teleskopen, wie der Infrared Telescope Facility (IRTF) auf Mauna Kea, sind geplant.

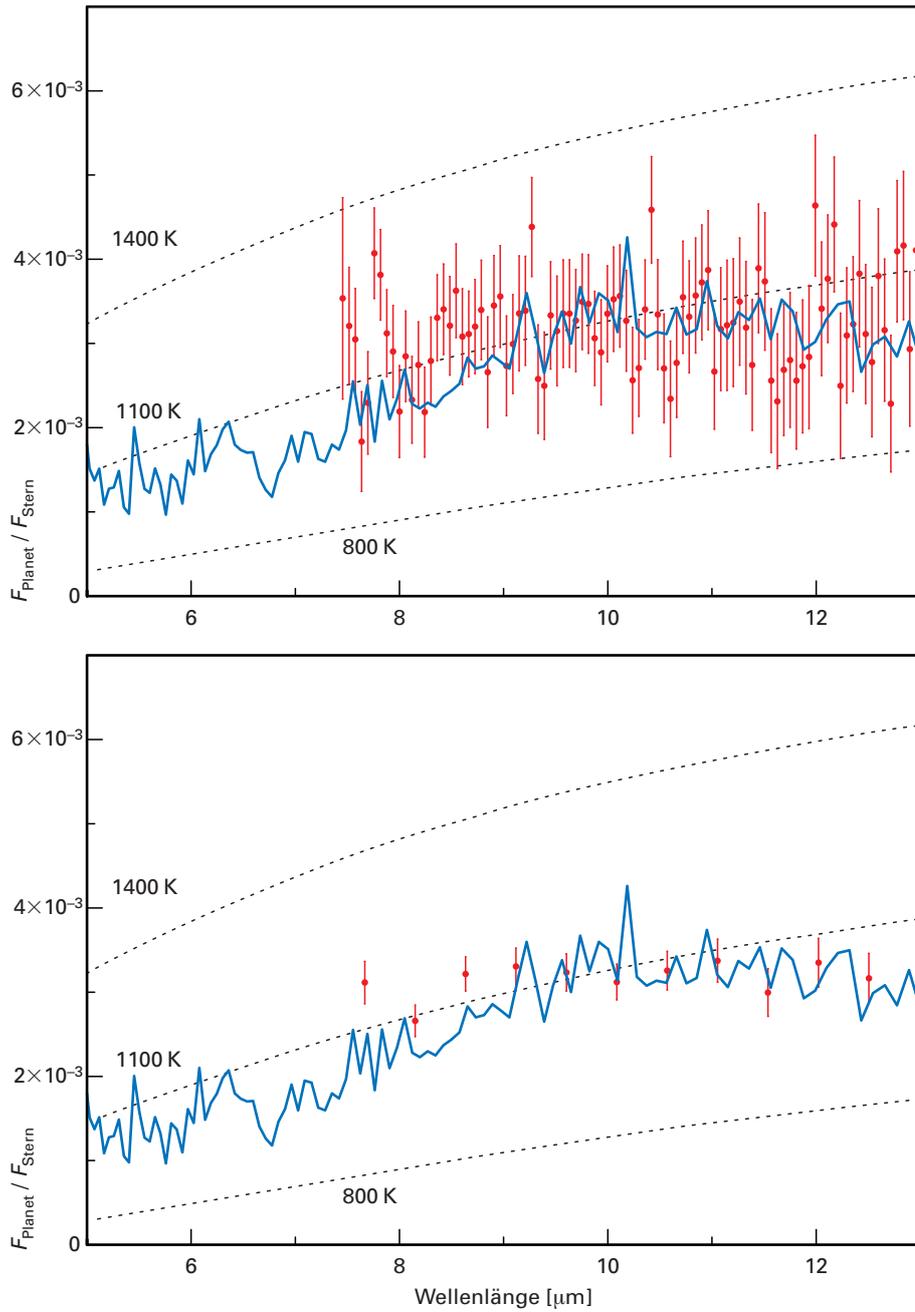


Abb. II.4.6: *Oben:* Das Spektrum von HD 209545b im Vergleich mit Modellatmosphären. *Unten:* Rote Punkte markieren signifikante Abweichungen des Spektrums vom Modell.

*Jeroen Bouwman
in Zusammenarbeit mit:
Jet Propulsion Laboratory, Pasadena
California Institute of Technology, Pasadena*

II.5 Zwerggalaxien unter der Lupe

Die ersten wissenschaftlichen Arbeiten am LBT

Auf dem Mount Graham in Arizona entsteht unter maßgeblicher Beteiligung des MPIA das Large Binocular Telescope (LBT). Dessen Einzigartigkeit besteht darin, dass zwei große Primärspiegel auf einer gemeinsamen Montierung das Licht der Sterne und Galaxien sammeln und in einem Brennpunkt zusammenführen. Im Frühjahr 2007 startete die wissenschaftliche Demonstrationsphase mit einem der beiden Spiegel und einer Kamera in dessen Primärfokus. Die ersten Ergebnisse aus dieser Phase veröffentlichte ein internationales Astronomenteam um Matthew Coleman vom MPIA. Es untersuchte drei erst kürzlich entdeckte Zwerggalaxien, die unser Milchstraßensystem begleiten. Als überraschend erwies sich die Form der Herkules-Zwerggalaxie: Sie ist extrem stark abgeplattet und ähnelt einer Scheibe oder Zigarre. Die Ursache dafür ist nicht abschließend geklärt – möglicherweise hat die Gravitation des Milchstraßensystems die Zwerggalaxie verformt. Die beiden anderen Zwerggalaxien Canes Venatici I und Leo T sind ebenfalls sehr interessant: Ihre Sternpopulationen sind unterschiedlich alt, was auf komplexe Entwicklungsgeschichten hindeutet.

Im Verlauf des Jahres 2007 wurde im LBT auch der zweite Spiegel eingesetzt (Abb. II.5.1), die ersten Beobachtungen erfolgten jedoch mit nur einem der beiden 8,4-Meter-Spiegel. Hierfür stand die Large Binocular Camera für den blauen Kanal (LBC Blue) im Primärfokus zur Verfügung. LBC Blue und sein zukünftiger Zwilling für den roten Spektralbereich, LBC Red, wurden von den italienischen LBT-Partnern entwickelt. LBC Blue ist mit vier CCDs zu jeweils 2048×4608 Pixel ausgestattet und bildet ein 23×23 Quadratbogenminuten großes Himmelsfeld ab, was fast der Größe des Vollmondes entspricht; Diese Kamera ist gewissermaßen eine CCD-Weitwinkelkamera mit 38 Megapixel. Sie ist auf den Wellenlängenbereich von 320 bis 500 nm spezialisiert und mit einer Reihe von Standardfarbfilttern ausgerüstet.

Abb. II.5.1: Das LBT mit beiden Hauptspiegeln. Die ersten Beobachtungen wurden mit dem rechten Spiegel gemacht (Bild: LBTO).



Die Herkules-Zwerggalaxie

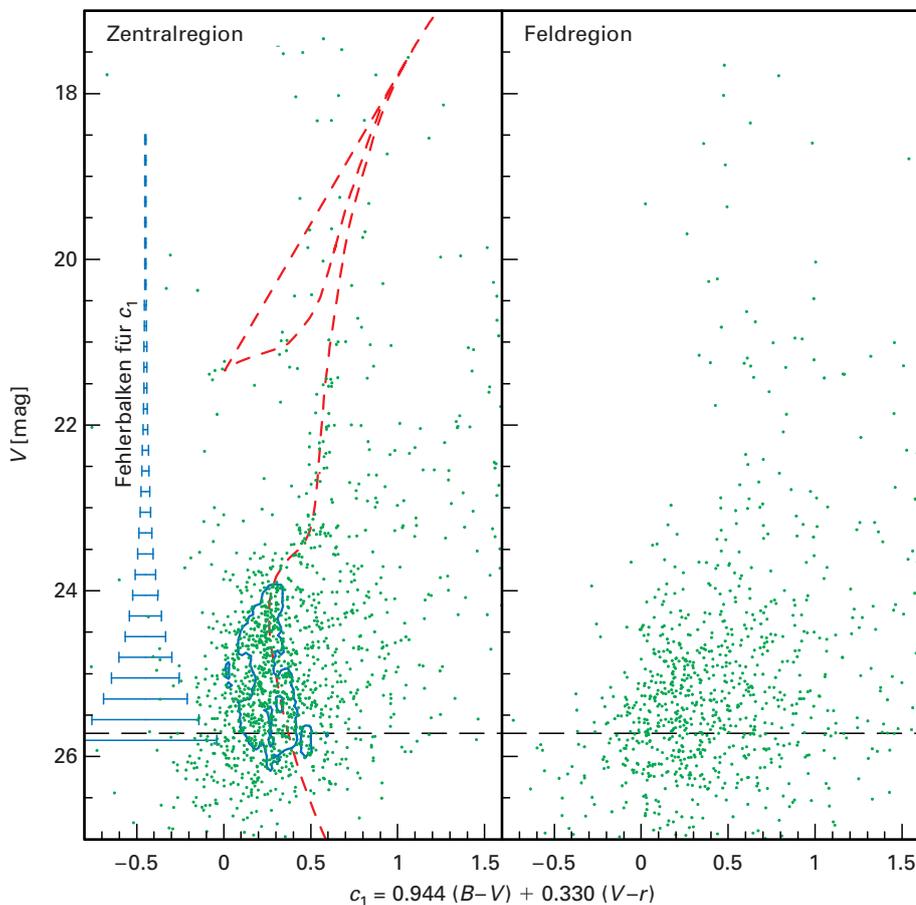
Bis zum Ende des 20. Jahrhunderts waren neun kugelförmige Zwerggalaxien (dwarf spheroidal galaxies) als Begleiter unserer Galaxis bekannt. Durch den Sloan Digital Sky Survey (SDSS), an dem auch das MPA beteiligt ist, hat sich diese Zahl innerhalb von nur drei Jahren verdoppelt. Diese kleinen Galaxien besitzen eine sehr geringe Flächenhelligkeit und sind daher sehr schwer zu entdecken und zu studieren.

Von den bereits untersuchten Objekten dieser Art ist bekannt, dass Dunkle Materie den größten Teil ihrer Gesamtmasse ausmacht. Außerdem weisen sie sehr unterschiedliche Entwicklungsgeschichten auf, was sich im Alter ihrer Sternpopulationen widerspiegelt. Die Untersuchung dieser lichtschwachen Sternsysteme erfordert leistungsstarke Teleskope, weswegen unser Wissensstand über sie noch sehr lückenhaft ist. Insbesondere ist noch weitgehend unklar, auf welche Weise Entstehung und Entwicklung dieser Satellitengalaxien mit derjenigen unserer Milchstraße verwoben sind. Warum ist das Verhältnis von Dunkler zu normaler Materie in den Zwerggalaxien viel höher als im Milchstraßensystem? Dies sind nur zwei von vielen weitgehend ungeklärten Fragen.

Die Zwerggalaxie im Sternbild Herkules wurde erst kurz vor den hier beschriebenen LBT-Beobachtungen in den Daten des SDSS entdeckt. Sie ist etwa 456 000 Lichtjahre entfernt und ihr Masse-Leuchtkraft-Verhältnis weist einen extrem hohen Wert von $332 M_{\odot}/L_{\odot}$ (mit einer Unsicherheit von 50 %) auf. Zum Vergleich: Das Masse-Leuchtkraft-Verhältnis des Milchstraßensystems liegt bei einem Wert von 50 bis $100 M_{\odot}/L_{\odot}$. Mehr war bis zu Beobachtungen von Coleman und Kollegen über die Herkules-Zwerggalaxie nicht bekannt.

Für seine photometrischen Untersuchungen nahm das Team die Herkules-Zwerggalaxie durch drei Filter (B , V und r) auf. Die Aufnahmeserien erreichten eine untere Grenzhelligkeit von 25.5 mag, so dass für diese Galaxie erstmals ein nahezu vollständiges Farben-Helligkeits-Diagramm (FHD) erstellt und die gesamte Population modelliert werden konnte (Abb. II.5.2). Die besten Werte ergaben sich für eine einzige 13 Milliarden Jahre alte Sternengeneration mit einer entsprechend geringen Metallizität. Die Entfernung ergab sich zu 132 kpc (430 000 Lj). Diese Werte wurden zunächst für die Sterne im Kernbereich ermittelt.

Abb. II.5.2: Das Farben-Helligkeitsdiagramm der Zentralregion des Herkules-Zwerggalaxie (*links*) und die Sterne einer nahen Feldregion. (*rechts*).



Mit diesen Werten wurde der Versuch unternommen, die weiter außen liegenden Sterne ebenfalls zu identifizieren – ein schwieriges Unterfangen, weil in mehreren Schritten Vordergrundsterne und Hintergrundgalaxien identifiziert werden mussten. Letztere konnten zum Großteil eliminiert werden, weil sie im Gegensatz zu den Sternen nicht punktförmig, sondern ausgedehnt erscheinen. Die restlichen, punktförmig erscheinenden Hintergrundgalaxien konnten aufgrund ihrer Farben ausgesondert werden. Feldsterne, die nicht zur Herkules-Zwerggalaxie gehören, ließen sich mit Hilfe eines Hel-

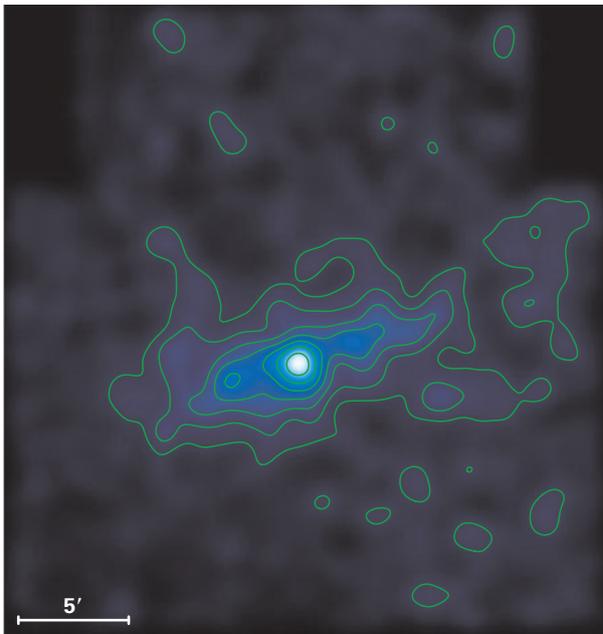
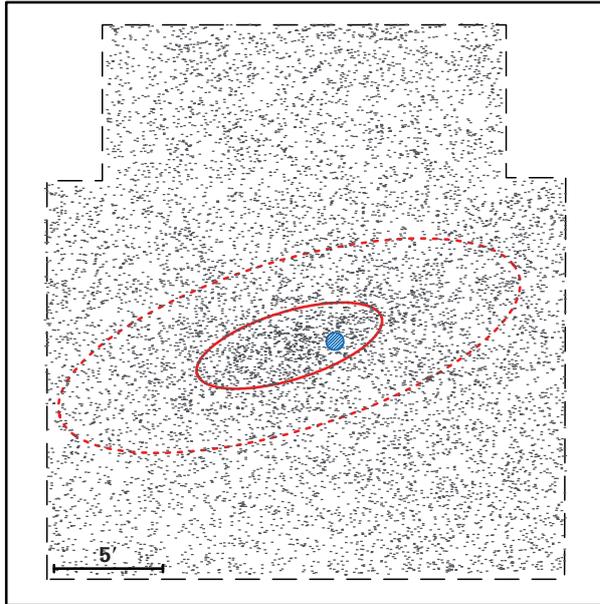


Abb. II.5.3: Die Konturdarstellung der Sterndichte in der Herkules-Zwerggalaxie offenbart deren langgestreckte Form.

ligkeitskriteriums sowie durch den Vergleich mit einem benachbarten Himmelsgebiet ausschließen (Abb. II.5.2 rechts).

Mit diesen beiden Verfahren wurden rund 85 Prozent aller Objekte im FHD entfernt. Nun ließ sich die räumliche Ausdehnung und Struktur der Herkules-Zwerggalaxie ermitteln. Wie Abb. II.5.3 zeigt, ist dieses Sternsystem elliptisch geformt mit einem außergewöhnlich großen Achsenverhältnis von 3 : 1; die Länge der großen Halbachse beträgt 550 Lichtjahre.

Ein derart großes Achsenverhältnis wurde bislang bei keiner anderen Zwerggalaxie beobachtet. Lediglich die 65 000 Lichtjahre entfernte Sagittarius-Zwerggalaxie weist eine ähnlich kuriose Form auf. Hier hat sie ihren Ursprung in den starken Gezeitenkräften des Milchstraßensystems. Ein ähnliches Schicksal erleidet auch die 230 000 Lichtjahre entfernte Ursa-Minor-Zwerggalaxie, deren Achsenverhältnis etwa 2 : 1 beträgt. Doch diese beiden Sternsysteme stehen dem Milchstraßensystem viel näher als die Herkules-Zwerggalaxie. Eine Abschätzung zeigt, dass Gezeitenkräfte die Herkules-Zwerggalaxie nur dann erheblich verformen können, wenn diese nicht weiter als 24 000 Lichtjahre vom Milchstraßensystem entfernt ist (alle Entfernungsangaben beziehen sich auf das Zentrum des Milchstraßensystems). Da der heutige Abstand 400 000 Lichtjahre beträgt, können Gezeitenkräfte nur dann für die elliptische Form verantwortlich sein, wenn die Herkules-Zwerggalaxie das galaktische Zentrum auf einer hoch exzentrischen Bahn (Exzentrizität $e > 0.9$) umläuft und sich derzeit etwa an ihrem fernsten Punkt befindet. Weitere Analysen müssen zeigen, ob dieses Modell glaubwürdig ist.

Die andere Erklärung wäre, dass die elliptische Form die Folge einer schnellen Rotation der Zwerggalaxie ist. Doch ist kein weiteres Sternsystem dieser Art bekannt, das auch nur annähernd so schnell rotiert wie man es für die Herkules-Zwerggalaxie fordern müsste. Weitere spektroskopische Beobachtungen sind deshalb nötig, um diese Möglichkeit zu überprüfen. In jedem Fall aber ist die Herkules-Zwerggalaxie ein überraschendes Objekt, das Modellen für die Entwicklung des Milchstraßensystems eine weitere interessante Facette hinzufügt.

Komplexe Sternentstehungsgeschichten in Canes Venatici I und Leo T

Zwei weitere Zwerggalaxien namens Canes Venatici I und Leo T wurden in den Daten des SDSS gefunden. *Canes Venatici I* ist mit 730 000 Lichtjahren ebenfalls sehr weit von unserer Galaxis entfernt und war deshalb auch bisherigen Himmelsdurchmusterungen entgangen. Ihre Masse beträgt 10^7 bis 10^8 Sonnenmassen.

Eine erste Untersuchung bestätigte zunächst die Vermutung, dass dieses Sternsystem – wie für Zwerggalaxien in dieser großen Entfernung üblich – sehr alt ist. Doch

dann deutete eine weitere Arbeit die Existenz einer jungen Sternpopulation an. Beobachtungen einer internationalen Astronomengruppe um Rodrigo Ibata vom Observatoire de Strasbourg ließen zudem vermuten, dass sich die beiden Sternpopulationen auch kinematisch unterscheiden. Eine andere Astronomengruppe konnte diese Vermutung hingegen nicht bestätigen. Tiefe photometrische Beobachtungen waren nötig, um die spannende Frage nach der Existenz zweier unterschiedlich alter Sternpopulationen zu entscheiden.

Ein Team um Nicolas Martin und Matthew Coleman vom MPIA nahm deshalb die Zwerggalaxie mit der LBC blue erneut in zwei Farbfiltern (B und V) bis zu einer Grenzgröße von etwa 25.5 mag auf: Diese Aufnahmen reichten ca. drei Größenklassen weiter als die bis dahin vorhandenen Daten. Und erneut konnten die Sterne auf dem Riesenast und der Abzweig alter Sterne von der Hauptreihe vermessen werden. Nachdem die Daten von Feldsternen und Hintergrundgalaxien bereinigt waren, konnten an das FHD berechnete Isochronen der Sternentwicklung angepasst werden mit dem Ergebnis, dass Canes Venatici I 719 000 Lichtjahre entfernt ist; ihre Hauptsternpopulation ist metallarm und etwa 14.1 Milliarden Jahre alt.

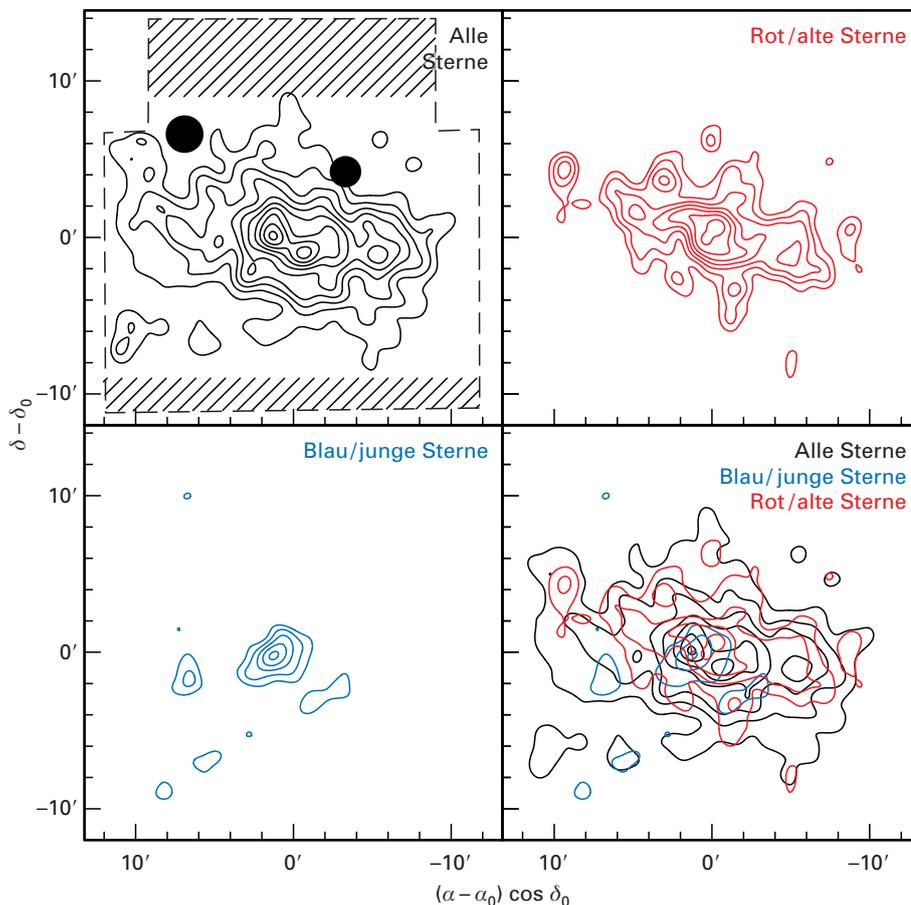
Gleichzeitig wurde eine Gruppe von blauen Sternen erkennbar. Diese auch räumlich separate Gruppe befindet sich etwa 210 Lichtjahre östlich des Zentrums der

Zwerggalaxie. Damit scheidet eine mögliche Deutung dieser blauen Sterne als so genannte Blue Stragglers aus. Das sind Doppelsterne, die blau erscheinen, aber keine jungen Sterne sind. Da es aber keinen ersichtlichen Grund für die Annahme gibt, dass sich eine Gruppe von Blue Stragglers in einem speziellen Bereich einer Zwerggalaxie angesammelt hat, bleibt als einfachste Erklärung, dass die blauen Objekte junge Sterne sind. Ihr Alter liegt nach Modellrechnungen zwischen 1.4 und 2 Milliarden Jahren. Diese jungen Sterne scheinen etwas metallreicher zu sein als die der älteren Generation.

Eine genauere Analyse erbrachte für die alte Sternpopulation eine Gesamtleuchtkraft von 35 000 und für die junge von 3 500 Sonnenleuchtkräften. Umgerechnet bedeutet dies, dass die junge Sternpopulation zur gesamten stellaren Masse von Canes Venatici I drei bis fünf Prozent beiträgt.

Abb. II.5.4 zeigt eine Konturdarstellung der mit dem LBT beobachteten alten (rot dargestellt) und jungen (blau) Sternpopulation. Ein Vergleich erbrachte eine sehr gute räumliche Übereinstimmung zwischen der Verteilung der jungen Population aus der LBT-Studie

Abb. II.5.4: Konturdarstellung der Sternverteilung in Canes Venatici I. *Oben links:* alle Sterne, *rechts:* alte rote Sterne, *unten links:* blaue junge Sterne, *rechts:* beide Populationen.



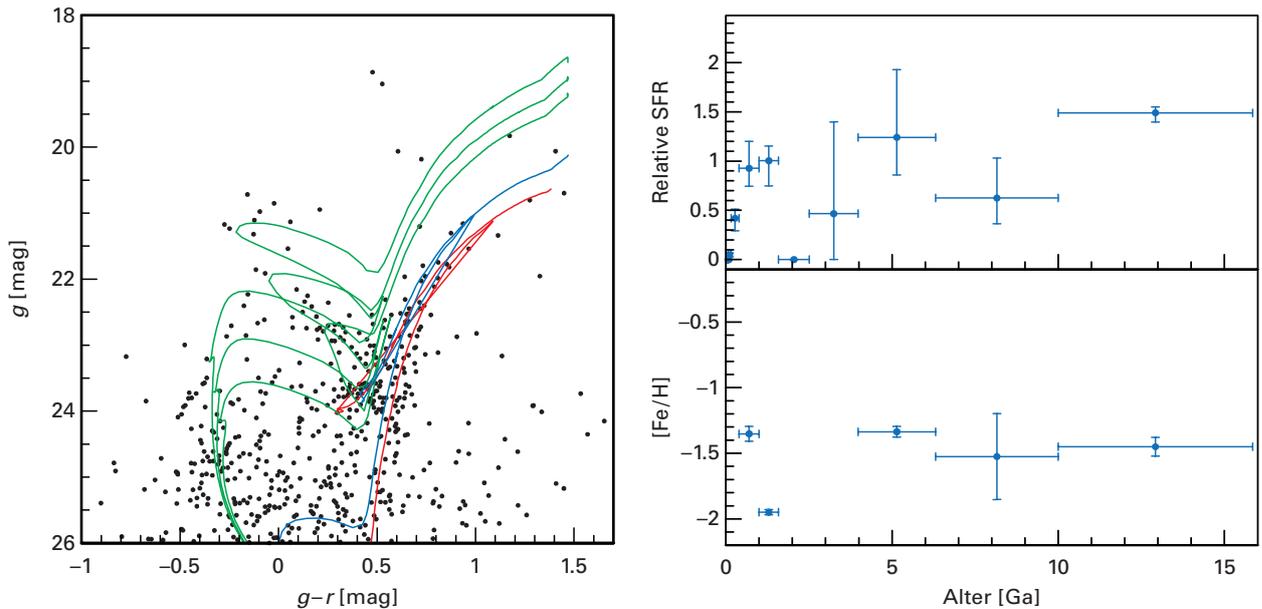


Abb. II.5.5: Links: Das Farben-Helligkeitsdiagramm der Zwerggalaxie Leo T mit Entwicklungsmodellen; rechts: Die Entwicklung der Sternentstehungsrate und der Metallizität.

und den erwähnten spektroskopischen Untersuchungen der Gruppe um Ibata. Demnach muss man davon ausgehen, dass die beiden Sterngruppen sich auch kinematisch unterscheiden. Schon diese ersten Studien offenbaren demnach eine komplexe Entwicklungsgeschichte dieser weit entfernten Zwerggalaxie, die schon in Kürze weitere Beobachtungen nach sich ziehen wird.

Die ebenfalls im Rahmen des SDSS entdeckte *Zwerggalaxie Leo T* stellt an die Beobachtungen erhebliche Anforderungen, denn mit 1.38 Millionen Lichtjahren ist sie die mit Abstand entfernteste bekannte Zwerggalaxie. Auch hier ermöglichten die Aufnahmen mit dem LBT eine tiefgehende Photometrie. Das FHD (Abb. II.5.5 links) erwies sich als ziemlich komplex und ließ sich nur als Überlagerung mehrerer Populationen darstellen. Demnach existiert dort eine sehr junge Sternpopulation mit einem Alter zwischen 400 Millionen und einer Milliarde Jahren und eine wesentlich ältere Population. Eine genauere Analyse deutet darauf hin, dass es in dieser Zwerggalaxie eine lang andauernde Phase der Sternentstehung gab, die vor etwa fünf Milliarden Jahren endete. Vor etwa einer Milliarde Jahren setzte eine neue Sternentstehungsphase ein, die sich bis vor etwa 400 Millionen Jahren hinzog. Erstaunlicherweise änderte sich die Metallizität der Sterne von der ersten zur zweiten Sternentstehungsphase nicht signifikant (Abb. II.5.5 rechts).

Diese ersten Beobachtungen haben die Leistungsfähigkeit des LBT eindrucksvoll unter Beweis gestellt. Gleichzeitig erwiesen sich die untersuchten Zwerggalaxien als sehr interessant, und die Ergebnisse werfen eine Reihe von Fragen auf: Warum haben sich diese Zwerggalaxien so unterschiedlich entwickelt? Wie lässt sich ihre

Evolution in das gesamte Entwicklungsszenario für unsere Galaxis einfügen? Welche Rolle haben die Halos aus Dunkler Materie hierbei gespielt?

Diesen Fragen wird die Gruppe des MPIA weiter nachgehen. LBT-Beobachtungen der Zwerggalaxien Leo II und Ursa Major II liegen bereits vor und werden auf die beschriebene Art und Weise analysiert. Beobachtungen weiterer Zwerggalaxien wurden bereits beantragt, um ein umfassendes Bild von möglichst allen Zwerggalaxien zu erhalten. Dies sollte weitere Aufschlüsse über die Entwicklung dieser lichtschwachen Sternsysteme geben.

Geplant sind zudem weitere Beobachtungen der Herkules-Zwerggalaxie, mit denen man der Frage nachgehen will, ob wirklich die Gezeitenkräfte des Milchstraßensystems diese Galaxie verformt haben. Sollte dies der Fall sein, so müssten sich weitere Sterne finden lassen, die aus der Galaxie herausgezogen wurden und nun einen »Gezeitenschweif« bilden.

In der Zukunft hoffen die Astronomen, im Rahmen des Projektes PanSTARRS 1, an dem das MPIA beteiligt ist, weitere Zwerggalaxien zu entdecken. Diese könnten dann ebenfalls mit dem LBT detailliert untersucht werden.

*Matthew G. Coleman, Jelte T. A. De Jong,
Nicolas F. Martin, Hans-Walter Rix,
Eric F. Bell, Hans Hippelein.*

*In Zusammenarbeit mit:
Steward Observatory, Tucson (USA),
Ohio State University, Columbus (USA),
Osservatorio Astronomico di Roma, Rom,
Osservatorio Astronomico di Padova, Padua,
Osservatorio Astronomico di Trieste, Triest (Italien),
Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics,
Cambridge (USA),
MPI für Extraterrestrische Physik, Garching*

II.6 Aktivität Schwarzer Löcher in fernen Quasaren

In den vergangenen Jahren haben zahlreiche Arbeiten die These verfestigt, dass supermassereiche Schwarze Löcher in den Zentren von Galaxien die Entstehung und Entwicklung dieser Sternsysteme entscheidend beeinflusst haben. Enge Korrelationen zwischen den Massen der Schwarzen Löcher einerseits und der Geschwindigkeitsdispersion beziehungsweise der Masse der sie umgebenden Bulges andererseits belegen dies eindrücklich. Viele Fragen sind in diesem Zusammenhang noch offen: Wie schnell sind die Schwarzen Löcher im jungen Universum gewachsen, wie haben sie ihre Umgebung beeinflusst? Welche Rolle spielten sie im jungen Universum, insbesondere während des Zeitalters der Reionisation? Diesen Fragen ging ein internationales Team unter Leitung des MPIA nach, indem es fünf Quasare mit Rotverschiebungen um $z = 6$ spektroskopisch untersuchte (Abb. II.6.1). Diese Objekte sandten das heute empfangene Licht nur etwa eine Milliarde Jahre nach dem Urknall aus. (Das Weltalter beträgt nach heutigem Wissen 13.7 Milliarden Jahre.)

Große Himmelsdurchmusterungen haben in den vergangenen Jahren eine Fülle von Daten über Quasare zu Tage gefördert. Allein der Sloan Digital Sky Survey (SDSS), an dem das MPIA beteiligt ist, lieferte auf einer Himmelsfläche von 5282 Quadratgrad mehr als 46 000 Quasare. Eine darauf basierende Studie aus dem Jahr 2002 zeigte eine starke Entwicklung in der Anzahldichte dieser Himmelskörper auf, wobei das Maxi-

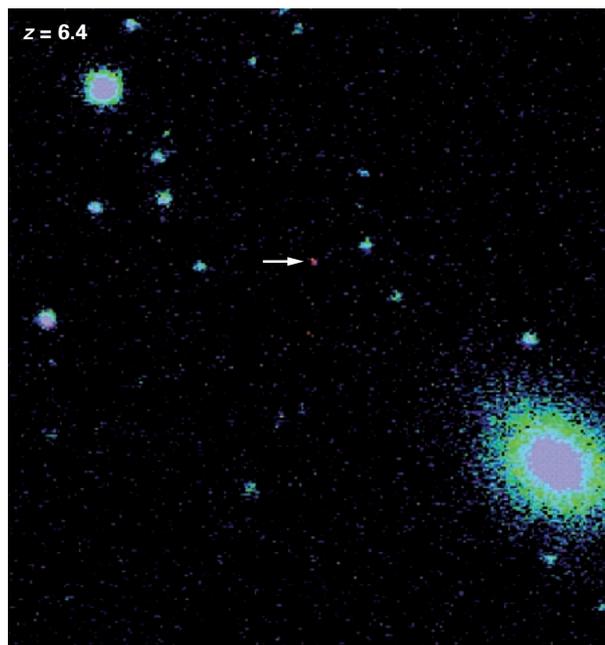
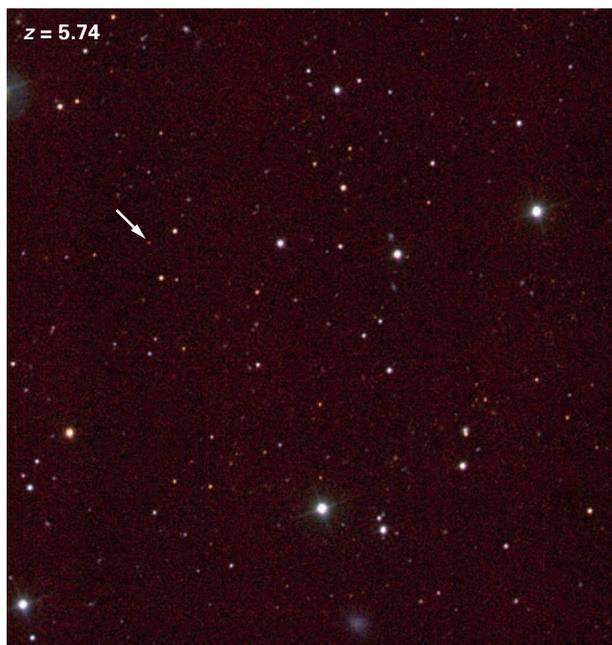
imum bei Rotverschiebungen zwischen $z = 2$ und $z = 3$ lag. Damals war das Universum zwischen 2.5 und 3.5 Milliarden Jahre alt. So ist die Anzahldichte dieser Objekte bei $z = 3$ etwa 40-mal so hoch wie bei $z = 6$. Hierbei wurde die Expansion des Universums berücksichtigt («comoving density»).

Andererseits konnten bei den Quasaren zwischen $z = 6$ und $z = 0$ keine wesentlichen spektroskopischen Unterschiede festgestellt werden. Dies deutet auf eine sehr schnelle Entwicklung der Schwarzen Löcher innerhalb der ersten Milliarde Jahre nach dem Urknall (bei $z > 6$) hin, die sich in den Quasarzentren befinden und für deren enorme Leuchtkraft verantwortlich sind.

Auswahl der beobachteten Quasare und Datenanalyse

In dem Datensatz des SDSS wurden bisher mehr als 20 hochrotverschobene Quasare mit $z > 5.7$ gefunden. Daraus wählte das Astronomenteam um Dominik Riechers, Jaron Kurk, Fabian Walter und Hans-Walter Rix fünf Objekte mit $5.8 < z < 6.3$ aus, die sich mit dem Very Large Telescope (VLT) beobachten ließen.

Abb. II.6.1: Zwei hoch rotverschobene Quasare bei $z = 5.74$ und $z = 6.4$, die auf Bildern des SDSS entdeckt wurden. Der zweite Quasar ist das am weitesten entfernte bekannte Objekt. Er sandte sein Licht aus, als das Universum 800 Millionen Jahre alt war. (Foto: S. Kent, SDSS Collaboration)



Die Untersuchungen wurden mit dem Nahinfrarot-Spektrografen ISAAC (Infrared Spectrometer And Array Camera) ausgeführt. In dem Wellenlängenbereich von 1.0 bis 2.5 μm finden sich Emissionslinien von C IV, Mg II und Fe II, die sich für die Analyse einiger Quasareigenschaften, insbesondere der Massen ihrer zentralen Schwarzen Löcher, eignen. Die Objekte wiesen im z-Band Helligkeiten zwischen 18.7 und 20.5 auf, was für die Spektren Integrationszeiten von bis zu zwölf Stunden erforderte.

Abb. II.6.2 zeigt eine Überlagerung aller Spektren unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Rotverschiebungen. Sie demonstriert sehr anschaulich die typischen Merkmale. Gut erkennbar sind dominante Emissionslinien, wie Lyman-alpha, C IV und Mg II, während die Fe-II-Linien nur schwach ausgeprägt sind. Unterhalb von Lyman- α sinkt die Intensität fast auf null ab. Dieses für hoch rotverschobene Quasare typische Phänomen nennt man Gunn-Peterson-Trog. Er entsteht durch Absorption von neutralem Wasserstoff, der sich zwischen dem Quasar und der Erde befindet. Bei Quasaren im Zeitalter der Reionisation (also in der Ära, in der der interstellare Wasserstoff im Universum noch überwiegend neutral war) führt dies zu fast vollständiger Absorption.

Die Massen der zentralen Schwarzen Löcher in den Quasaren lassen sich aus den Äquivalentbreiten der Emissionslinien bestimmen. Wie Abb. II.6.2 demonstriert, ist dies erst nach sorgfältiger Subtraktion des darunter liegenden Kontinuums möglich. Erschwerend kam hier hinzu, dass in diesem Wellenlängenbereich ne-

Abb. II.6.2: Eine Überlagerung aller fünf Quasarspektren (bezogen auf dieselbe Ruhewellenlänge) zeigt ihre wichtigsten Emissionslinien.

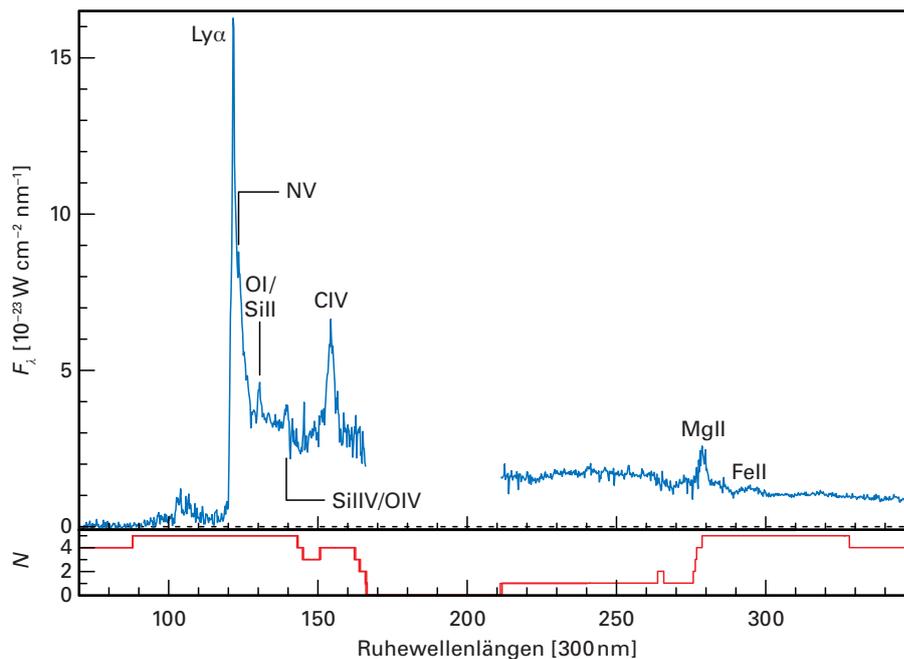
ben dem »normalen« thermischen Kontinuum ein so genanntes Balmer-Pseudokontinuum auftritt, das sich aus einer Serie von Wasserstoff-Emissionslinien zusammensetzt.

Nach der Modellierung und anschließenden Subtraktion dieser beiden Kontinua wurden die Äquivalentbreiten der Emissionslinien bestimmt. Hierbei musste für Fe II eine besondere Prozedur angewandt werden, weil es sich um eine Serie von Linien handelt. Dies geschah mit Hilfe eines Musterspektrums (englisch: template), wie es für hoch rotverschobene Quasare typisch ist. Dieses Musterspektrum wurde aus zahlreichen weniger extrem rotverschobenen Quasaren aus dem SDSS bestimmt.

Anreicherung der Quasarumgebung mit schweren Elementen

Einer der bemerkenswertesten Befunde bei der Analyse von hoch-rotverschobenen Quasarspektren ergibt sich bei Studien der Häufigkeit »schwerer« Elemente (schwerer als Helium), Metallizität genannt. Nach der gängigen Theorie entstanden im Urknall fast ausschließlich die leichtesten Elemente Wasserstoff und Helium. Schwerere Elemente, wie Kohlenstoff, Stickstoff oder Sauerstoff, entstanden erst später bei Fusionsreaktionen im Innern massereicher Sterne, die diese »Metalle« dann über Sternwinde und bei Supernova-Explosionen an ihre Umgebung abgaben. Das interstellare Medium wurde also nach und nach mit schweren Elementen angereichert. Aus früheren Studien der entferntesten Quasare kann man schließen, dass dieser Vorgang sehr effizient abgelaufen sein muss.

Das Häufigkeitsverhältnis von Eisen (Fe) zu Magnesium (Mg) kann in dieser Hinsicht als »kosmologische



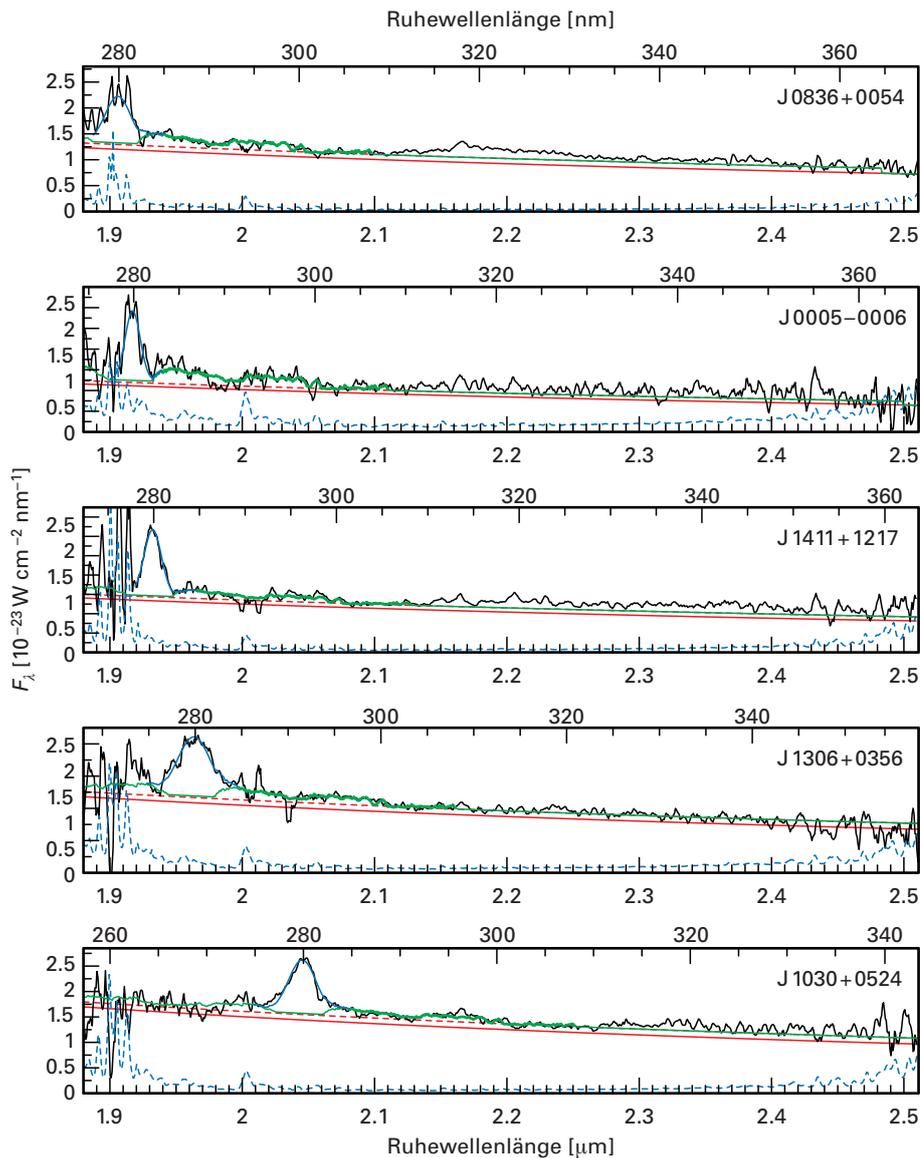


Abb. II.6.3: Spektren der fünf Quasare im Bereich der Mg-II-Linie. Einige Merkmale sind farblich hervorgehoben: *Blau durchgezogen:* Fit an die Emissionslinie, *rot durchgezogen:* Kontinuum, *rot gepunktet:* Balmer-Kontinuum, *grün durchgezogen:* Musterspektrum für Fe II, *blau gepunktet:* Rauschgrenze.

Uhr« dienen. Eisen wird vornehmlich von Supernovae vom Typ Ia produziert, bei denen ein Weißer Zwerg in einem Doppelsternsystem explodiert. Magnesium hingegen stammt vorwiegend aus Supernovae vom Typ II, die auf Explosionen sehr massereicher Sterne zurückgehen. Da die Entwicklung eines massereichen Sterns bis zur SN II wesentlich schneller verläuft, als die eines massärmeren Sterns zu einer SN Ia, sollte das Verhältnis Fe/Mg in den ersten ein bis drei Milliarden Jahren nach dem Urknall sehr groß werden und danach langsam bis auf den heutigen Wert abnehmen. Allerdings haben Studien gezeigt, dass in elliptischen Galaxien be-

reits nach 300 Millionen Jahren ein maximales Fe/Mg-Verhältnis erreicht wurde. Diese Zeitspanne hängt allerdings von Parametern wie der Sternentstehungsrate, der Lebensdauer der Sterne und der ursprünglichen Massenfunktionen (Initial Mass Function) ab.

Aus dem Intensitätsverhältnis der Linien Fe II zu Mg II in den Spektren der fünf ausgewählten Quasare ließen sich nun die Element Häufigkeitsverhältnisse bestimmen (Abb. II.6.3). Die ermittelten Werte zwischen zwei und fünf mit Genauigkeiten zwischen 20 und 40 Prozent.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen anderer Arbeiten ist nicht trivial, da diese teilweise mit etwas anderen Methoden gewonnen wurden und die Unsicherheiten recht groß sind. Außerdem ist noch nicht vollständig geklärt, wie genau das Verhältnis der Fe II- zu den Mg II-Linien das wahre Häufigkeitsverhältnis widerspiegelt. Dennoch ist der in Abb. II.6.4 gezeigte Vergleich aufschlussreich: Im Großen und Ganzen bestätigt die neue Analyse den generellen Trend bisheriger Arbeiten, wo-

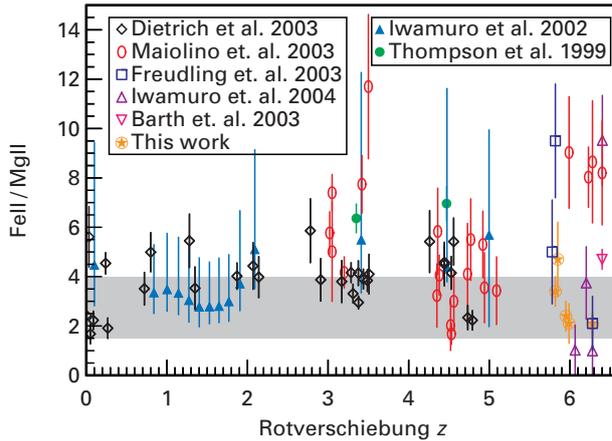


Abb. II.6.4: Das Linienverhältnis Fe II/Mg II in Abhängigkeit von der Rotverschiebung z . Die fünf Werte der neuen Studie um $z = 6$ sind mit einem Kreuz im Kreis (gelb) dargestellt.

nach sich selbst bei großen Rotverschiebungen kein Entwicklungstrend abzeichnet. Da das Universum bei $z = 6$ etwa 900 Millionen Jahre alt war, muss die Anreicherung mit schweren Elementen bereits zuvor sehr weit fortgeschritten gewesen sein. Nimmt man eine typische Anreicherungszeit von 300 Millionen Jahren an, so muss die Ära der Sternentstehung bereits bei Rotverschiebungen jenseits von $z = 8$ eingesetzt haben. Dieses Ergebnis setzt Maßstäbe für zukünftige Versuche, die erste Sternengeneration (Population III) nachzuweisen.

Die Massen der zentralen Schwarzen Löcher

Wie eingangs geschildert, ist die Entwicklung der zentralen Schwarzen Löcher eng an die der Galaxien gekoppelt. Die Entwicklung der Massen der Schwarzen Löcher könnte Aufschluss über diese noch unbekannte Wechselbeziehung geben. Aus den neuen Daten lassen sich diese Massenwerte auf drei unterschiedliche Arten ermitteln.

1. Die direkteste Methode besteht darin, die gesamte bolometrische Leuchtkraft der Quasare zu bestimmen. Nimmt man nun an, dass das Schwarze Loch mit der maximal möglichen Rate Materie aus der Umgebung aufammelt, so halten sich der Strahlungsdruck und die Schwerkraft die Waage. Man spricht dann von der Eddington-Leuchtkraft, mit der der Quasar strahlt. Setzt man die Eddington-Leuchtkraft gleich der bolometrischen Leuchtkraft, so erhält man die minimale Masse, die das Schwarze Loch haben muss, um diese Energie abstrahlen zu können.
2. Eine andere Methode beruht darauf, dass das Schwarze Loch von einer Gasregion umgeben ist, in der die Emissionslinien des Quasars entstehen. Diese Region nennt man Broad Line Region (BLR), weil die Linien durch die schnelle Rotation dieser Re-

gion stark verbreitert sind. Die Zentralmasse ergibt sich dann aus dem Radius der BLR und der Geschwindigkeit des darin befindlichen Gases. Beide Größen lassen sich unter gewissen Annahmen aus dem Spektrum, insbesondere aus der Mg II-Linienbreite, ableiten.

3. Eine dritte Methode beruht auf einer empirischen Relation zwischen der Zentralmasse und der Kontinuumsleuchtkraft bei 135 nm Wellenlänge und der C-IV-Linienbreite. Auch hier gehen Eigenschaften der BLR ein.

Alle drei Methoden wurden auf die Spektren der fünf Quasare angewandt. Da sie alle gewisse Unsicherheiten haben, liefern sie erwartungsgemäß auch unterschiedliche Massen (typischerweise um Faktoren zwei bis drei verschieden), wobei die C-IV-basierte Methode durchweg die größten Werte ergab. Insgesamt ergab sich eine Spanne von 300 Millionen bis 5.2 Milliarden Sonnenmassen. Die 300 Millionen Sonnenmassen stellen den kleinsten bislang bei hoch rotverschobenen Quasaren gemessenen Wert dar. Dennoch ergaben sich überwiegend sehr hohe Massenwerte, was auf ein rasches Wachstum der supermassereichen Schwarzen Löcher nach dem Urknall hindeutet. Zum Vergleich: Das Schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxis hat eine Masse von nur 3,6 Millionen Sonnenmassen. Dieses Phänomen des schnellen Wachstums zu erklären, gehört zu den vornehmsten Aufgaben der Kosmologie.

In diesem Zusammenhang wäre es sehr interessant herauszufinden, ob bei diesen hochrotverschobenen Quasaren die eingangs erwähnten Korrelationen zwischen den Massen der Schwarzen Löcher und den Massen beziehungsweise Geschwindigkeitsdispersionen der Bulges Gültigkeit besitzt – eine schwer zu beantwortende Frage, weil die entsprechenden Messdaten dieser extrem weit entfernten Quasare noch recht ungenau sind. Die Massen der Bulges lassen sich mit Hilfe von Beobachtungen des molekularen Gases in den Galaxien abschätzen, wie Dominik Riechers 2006 zeigen konnte (Jahresbericht 2006, S. 40).

Die bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die hochrotverschobenen Galaxien von der bekannten Relation zwischen den Massen der Schwarzen Löcher und den Massen beziehungsweise Geschwindigkeitsdispersionen der Bulges abweichen. Danach hat es den Anschein, als hätten sich die Schwarzen Löcher schneller entwickelt als die Galaxienbulges. Doch sind die Ergebnisse noch umstritten, und Computersimulationen können zudem noch keine klaren Voraussagen liefern.

Falls sich diese ersten Vermutungen bestätigen, so schließen sich sofort faszinierende Fragen an: Waren erst die Schwarzen Löcher da und bildeten sich dann erst die Galaxien? Wirkten die Schwarzen Löcher womöglich als »Kondensationskeime«, um die herum sich die Galaxien formierten? Forschergruppen des MPIA gehen diesen spannenden Frage nach, erste Ergebnisse werden in naher Zukunft erwartet.

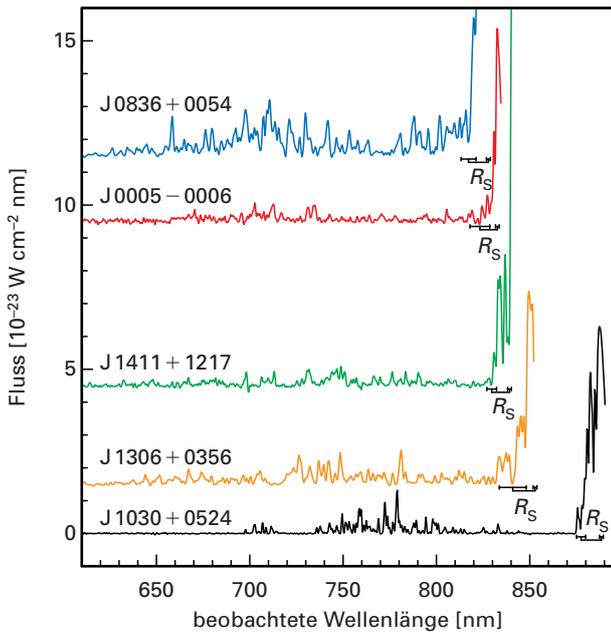


Abb. II.6.5: Gunn-Peterson-Trog in den fünf Spektren auf der »blauen« Seite der Lyman- α -Linie. Die Größe der Strömgren-Sphären R_S ist eingetragen.

Aktivitätszeiten der Quasare

Frühere Untersuchungen unter der Leitung amerikanischer Astronomen (die auch Teil dieses Teams sind) von 23 Quasaren mit Rotverschiebungen um $z = 6$ hatten in allen Fällen tiefe Gunn-Peterson-Tröge offenbart. Hieraus schließt man, dass das intergalaktische Medium bis nahe an die Quasare heran überwiegend neutral war. Gleichzeitig ist klar geworden, dass die Reionisation des Mediums durch energiereiche Strahlung ein komplexer Vorgang gewesen sein muss, der sich über einen längeren Zeitraum erstreckt hat.

Welchen Anteil die Quasare an der Reionisation hatten, ist heute eine viel diskutierte Frage. Das Schwarze Loch beziehungsweise die es umgebende Akkretionsscheibe erzeugte nach dem »Anschalten« von UV- und Röntgenstrahlung um sich herum eine sich beständig ausdehnende Sphäre ionisierten Gases im damals (bei $z > 6$) noch weitgehend neutralen intergalaktischen Medium. Im Kontinuumsspektrum markiert die langwellige (rote) Kante des Gunn-Peterson-Trogs den Radius

dieser sogenannten Strömgren-Sphäre. Allerdings ist die Bestimmung dieser Absorptionskante nicht einfach, weil die Absorption oft nicht vollständig ist (Abb. II.6.5).

Bei den fünf Quasarspektren bestimmten die Astronomen diese Kante visuell. Auf diese Weise konnten sie relativ einheitliche Strömgren-Radien mit Werten um 16 Millionen Lichtjahre berechnen. Daraus ergibt sich die interessante Frage, wie lange die Quasare wohl gebraucht haben, um diese Sphäre um sich herum zu schaffen?

Die Aktivitätsphase hängt von mehreren Größen ab, insbesondere der Emissionsrate ionisierender Photonen und der Dichte des neutralen Wasserstoffs. Unter bestimmten Annahmen lässt sich mit diesen Größen eine Untergrenze für die Aktivitätsdauer ermitteln. Allerdings sind die auf diese Weise ermittelten Werte sehr ungenau. Je nach Verfahren erhält man für die fünf Quasare Aktivitätszeiten zwischen 6 und 90 Millionen Jahren beziehungsweise zwischen einer und 20 Millionen Jahren. In jedem Fall sind die Werte klein im Vergleich zum damaligen Weltalter von 900 Millionen Jahren. Nach kosmischen Maßstäben beobachten wir die Quasare also in einer sehr frühen Aktivitätsphase.

Im Rahmen der hier geschilderten Untersuchungen führte Dominik A. Riechers seine Dissertation durch. Im Berichtsjahr wurde er an der Universität Heidelberg summa cum laude promoviert und erhielt für sein Forschungsprojekt »From the Epoch of Reionization to the Peak of Galaxy Formation: Properties of Intensely Star-Forming Galaxies in the Early Universe« ein Hubble Postdoctoral Fellowship am California Institute of Technology für die Jahre 2007 bis 2010.

Die weiteren Schritte werden darin bestehen, das derzeitige Datenmaterial auf eine breitere Basis zu stellen. Das MPIA-Team hat deshalb bereits die Beobachtung von weiteren 23 Quasaren aus dem SDSS beantragt. Dann sollen vor allem auch leuchtschwächere Objekte mit masseärmeren Schwarzen Löchern beobachtet werden.

*Jaron D. Kurk, Fabian Walter,
Dominik A. Riechers, Hans-Walter Rix*

In Zusammenarbeit mit:

*Steward Observatory, Tucson (USA),
Osservatorio Astronomico di Roma (Italien),
Princeton University (USA),
National Radio Astronomy Observatory, Socorro (USA),
Landessternwarte Heidelberg*

II.7 Zwerggalaxien – die fehlenden Satelliten der Milchstraße

Unsere Galaxis ist von einem ausgedehnten System von Satelliten umgeben. Das sind einerseits rund 160 bekannte Kugelsternhaufen, die in einem Entfernungsbereich bis 400 000 Lichtjahre um das Galaktische Zentrum kreisen. Dazu kommen die Zwerggalaxien, von denen im galaktischen bis vor kurzem neun bekannt waren. Heutige kosmologische Modelle sagen hingegen voraus, dass das Milchstraßensystem von mindestens 50 solcher lichtschwacher Sternsysteme umgeben sein sollte. Diese Diskrepanz zwischen Theorie und Beobachtung ist

als »missing satellite problem« bekannt. Jetzt gelang es innerhalb kurzer Zeit, in den Daten des Sloan Digital Sky Survey (SDSS) acht weitere Zwerggalaxien zu entdecken, vier davon gehen auf das Konto eines internationalen Astronomenteam unter der Leitung des MPIA und der Universität Cambridge. Zieht man die Nachweiseffizienz bei Zwerggalaxien und die nur partielle Himmelsabdeckung des SDSS in Betracht, so hat das »Problem der fehlenden Satelliten« damit an Schärfe verloren.

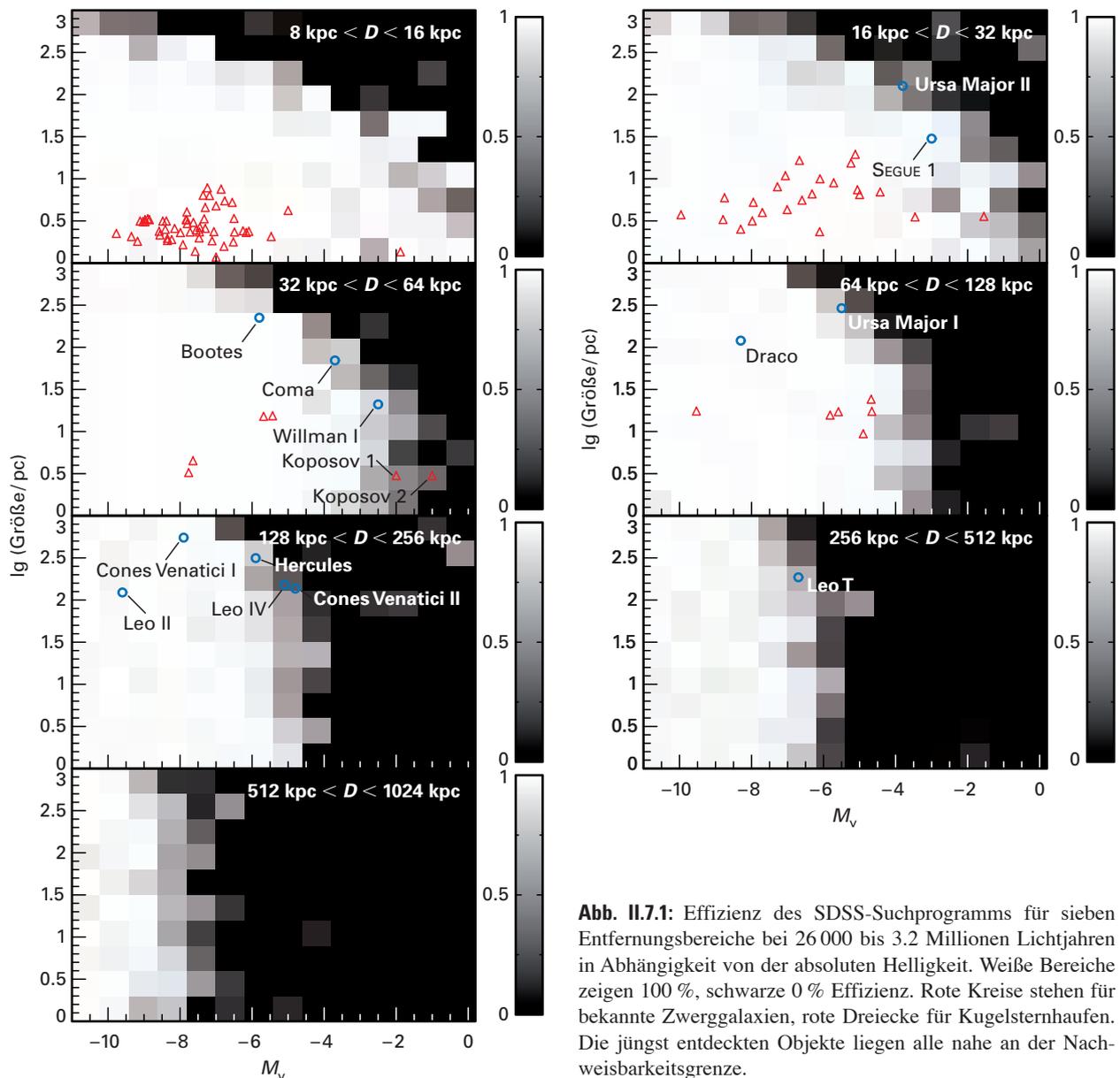


Abb. II.7.1: Effizienz des SDSS-Suchprogramms für sieben Entfernungsbereiche bei 26 000 bis 3,2 Millionen Lichtjahren in Abhängigkeit von der absoluten Helligkeit. Weiße Bereiche zeigen 100 %, schwarze 0 % Effizienz. Rote Kreise stehen für bekannte Zwerggalaxien, rote Dreiecke für Kugelsternhaufen. Die jüngst entdeckten Objekte liegen alle nahe an der Nachweisbarkeitsgrenze.

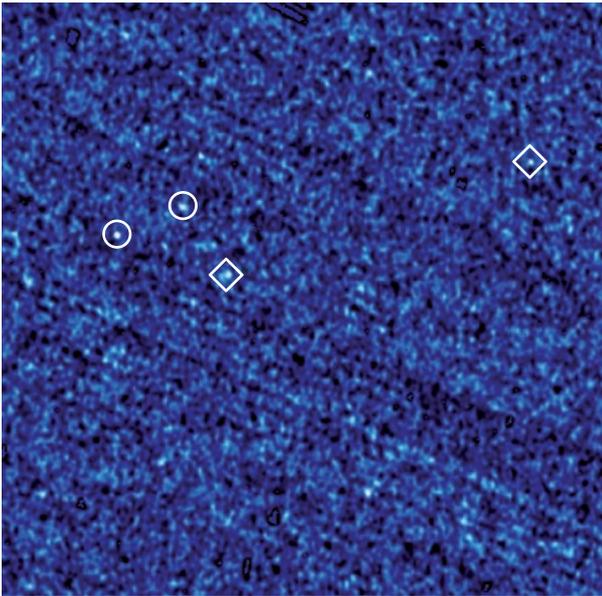
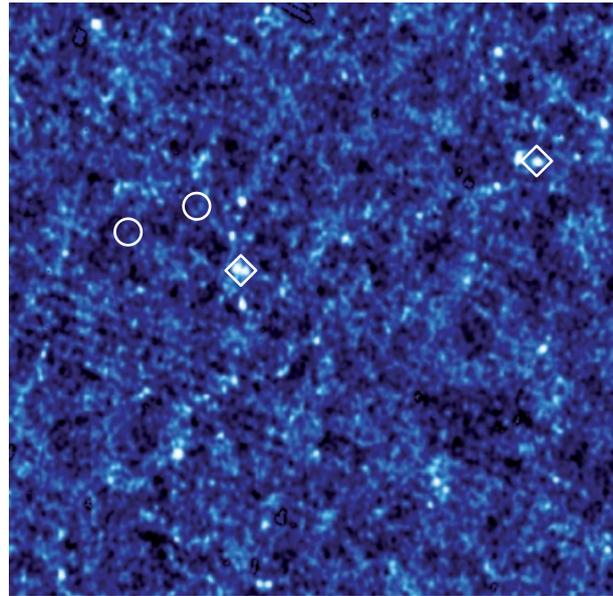


Abb. II.7.2: Ein 22 mal 22 Quadratgrad großes Feld des SDSS für Sterne (*links*) und Galaxien (*rechts*). Ursa Major I und Willman 1 (*Kreise*), zwei bekannte Satellitensysteme unserer Milchstraße, werden von dem Programm ebenso gefunden wie zwei ferne Galaxienhaufen (*Rauten*).



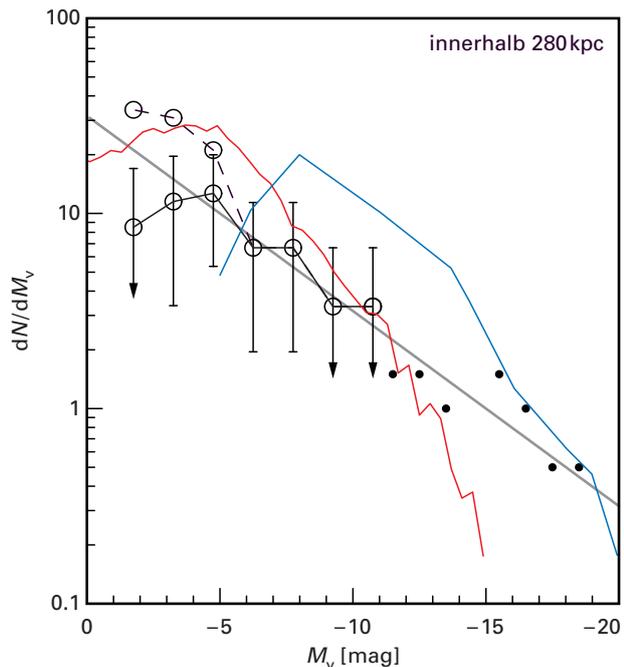
auch klar, dass die Entdeckung von Zwerggalaxien nur sehr eingeschränkt möglich war. Schließlich wurde mit dem Sloan Digital Sky Survey (SDSS), an dem das MPIA beteiligt ist, erstmals ein adäquates Instrumentarium verfügbar.

Heutige kosmologische Modelle beschreiben die Entstehung von Galaxien unter der Einwirkung von kalter Dunkler Materie. Demnach existierten im frühen Universum riesige Wolken aus Dunkler Materie, die als »Gravitationsfallen« für die normale baryonische Materie wirkten. Die Galaxien entstanden deshalb in den Zentren großer Halos aus Dunkler Materie. Allerdings waren diese Halos keine isolierten Gebilde, sondern sie wechselwirkten miteinander: Kleine Halos verschmolzen zu größeren oder gingen in den größeren auf. Ein Teil der kleinen Halos existierte aber weiter und umkreiste die großen Halos auf Satellitenbahnen. Während sich in den zentralen Halos große Galaxien bildeten, sollten in den Satellitenhalos Zwerggalaxien entstanden sein.

Computersimulationen deuteten bereits 1999 darauf hin, dass eine Galaxie wie unser Milchstraßensystem innerhalb eines Radius von etwa zwei Millionen Lichtjahren von rund 50 Zwerggalaxien umgeben sein sollte. Die Lokale Gruppe sollte innerhalb eines Radius von fünf Millionen Lichtjahren sogar an die 300 solcher Satellitengalaxien enthalten. Diese Vorhersage steht im deutlichen Widerspruch zu den Beobachtungen: Bis vor wenigen Jahren waren nur neun Zwerggalaxien bekannt.

Auf theoretischer Seite wurden viele Möglichkeiten diskutiert, um diese Diskrepanz zu erklären. So wurde beispielsweise vermutet, dass in manchen Satellitenhalos die Sternentstehung aus ungeklärten Gründen unterdrückt war, was zu einer großen Zahl dunkler, unsichtbarer Materieansammlungen geführt hat. Gleichzeitig war aber

Abb. II.7.3: Volumenkorrigierte Leuchtkraftfunktion für eine Maximalentfernung von 900 000 Lichtjahren (280 kpc). *Durchgezogene Linie mit offenen Kreisen:* Grenzgröße $r < 22.0$ mag, *gestrichelte Kurve:* Grenzgröße: $r < 22.5$. Die rote und blaue Linie zeigen die Ergebnisse von zwei Modellrechnungen zur Entstehung von Zwerggalaxien.



Die Suche nach der Nadel im Heuhaufen – vier neue Zwerggalaxien

Tatsächlich wurden in den SDSS-Daten schon in den Jahren 2005 und 2006 gleich vier neue Zwerggalaxien entdeckt. Sie wurden, wie allgemein üblich, nach den Sternbildern benannt, in denen sie sich befinden. Dies waren: Ursa Major I und II, Canes Venatici und Bootes. Einem internationalen Astronomenteam unter der Leitung des MPIA und der Universität Cambridge gelang es im Berichtsjahr, vier weitere Zwerggalaxien aufzuspüren. Ein weiteres lichtschwaches Objekt kam hinzu, bei dem es sich aber sehr wahrscheinlich um einen Kugelsternhaufen handelt.

Im Rahmen des SDSS wurde ein etwa 8000 Quadratgrad großes Gebiet um den galaktischen Nordpol (entsprechend etwa einem Fünftel der gesamten Himmelssphäre) durch fünf photometrische Filterbereiche hindurch aufgenommen. Die bislang entdeckten Zwerggalaxien sind auf diesen Aufnahmen nicht mit bloßem Auge erkennbar, vielmehr kommen sie erst bei systematischem, computergestütztem Suchen nach Überdichten von Sternen innerhalb bestimmter Helligkeits- und Farbbereiche zum Vorschein.

Ein wichtiges Kriterium bei der Suche nach Zwerggalaxien und der späteren Interpretation der Daten ist auch die Reichweite des SDSS. Helle Sterne auf dem Roten-Riesen-Ast lassen sich bis in Entfernungen von drei Millionen Lichtjahren nachweisen, während sehr kleine Sternsysteme, die kaum Rote Riesen enthalten, lediglich bis in einer Million Lichtjahren Entfernung nachweisbar sind. Damit reicht der SDSS weiter als jede andere Durchmusterung zuvor.

Unter diesen Randbedingungen entwickelten Sergej Koposov, Hans-Walter Rix und Eric Bell vom MPIA und Kollegen ein Programm, um Zwerggalaxien nachzuweisen. Ein solches Programm funktioniert wie folgt: Man sucht innerhalb eines Himmelsareals nach Sternen mit ausgewählten Farben und Helligkeiten und vergleicht diese mit erwarteten Werten für Hintergrundsterne. Ein bewährtes Verfahren bei der Suche nach Überdichten von Sternen oder nach anderen Abweichungen von Mittelwerten innerhalb eines bestimmten Gebietes ist die Anwendung eines räumlichen Filters. Dabei werden für alle Datenpunkte innerhalb eines bestimmten Winkelbereich am Himmel (in unserem Fall die Farben und Helligkeiten der Sterne) Mittelwerte bestimmt. Im Vergleich mit diesen Mittelwerten machen sich Abweichungen wie etwa die gesuchten Überdichten auf der gewählten Winkelskala des Filters (Englisch: kernel) bemerkbar.

Um die Effizienz des Programms zu testen wurden in die SDSS-Daten die Werte für »künstliche« Zwerggalaxien und Kugelsternhaufen eingefügt. Damit ließ sich, die Nachweisgrenze des Suchprogramms für sieben Entfernungsbereiche von 26 000 bis 3.2 Millionen

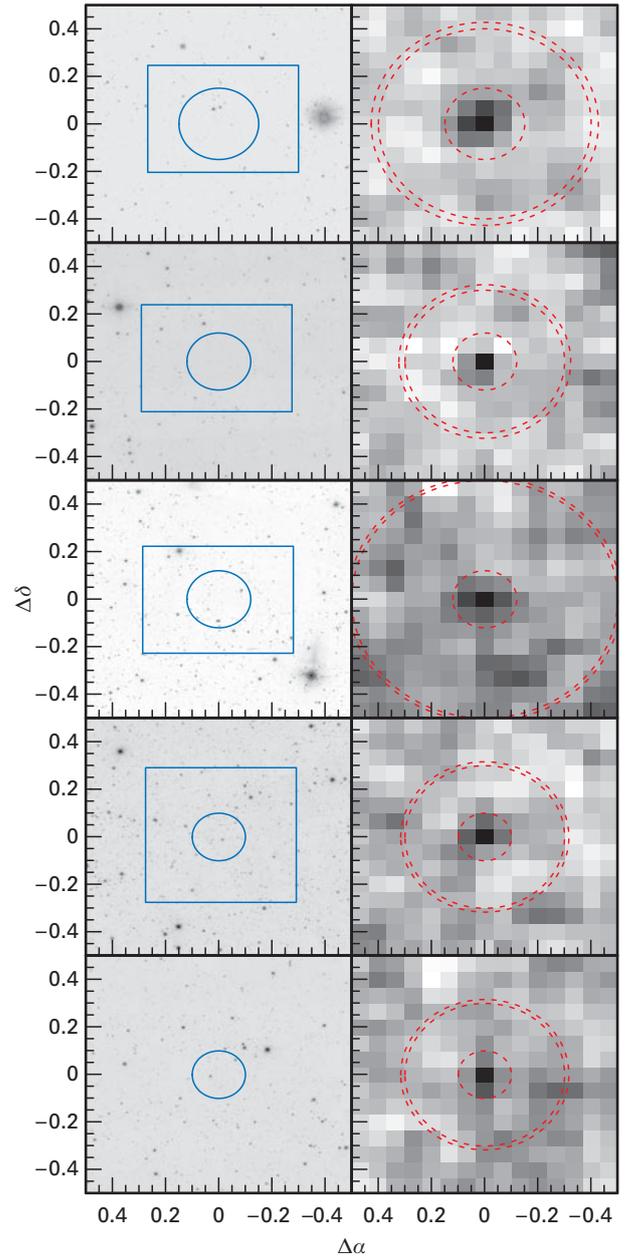


Abb. II.7.4: SDSS-Aufnahmen der angegebenen Objekte sowie die Positionen der SUBARU- und INT-Felder (*linke Spalte*). *Rechte Spalte:* die mit einem Kernel von 4' gefilterten Aufnahmen.

Lichtjahren in Abhängigkeit von der Helligkeit der gesuchten Objekte ermitteln (Abb. II.7.1). Die Größe des Kernels spielt hierbei eine wesentliche Rolle: Mit einem kleinen Kernel findet man zwar lichtschwächere Objekte als mit einem großen, aber dies geht zu Lasten der Galaxiengröße. Ein großer Kernel summiert nämlich mehr Sterne aus ausgedehnten Objekten auf und kann deshalb Objekte mit geringerer Flächenhelligkeit erkennen als ein kleiner Kernel.

Als Kompromiss wurde ein Kernel von 4 Bogenminuten verwendet, die Grenzhelligkeit lag bei 22.0 mag im Roten. Bei den Probeläufen des Programms stellte sich

zudem heraus, dass HII-Regionen und Galaxienhaufen irrtümlich als Zwerggalaxien identifiziert wurden (Abb. II.7.2). Dieses Problem ließ sich durch Vergleich mit existierenden Katalogen dieser Objekte beheben.

Mit dieser Methode gingen den Astronomen des MPIA und ihren Kollegen vier bislang unbekannte Zwerggalaxien ins Netz: Coma Berenice (Com), Canes Venatici II (CVn II), Leo IV und Hercules (Her). Bei dem fünften Objekt namens Segue 1 handelt es sich wahrscheinlich um einen Kugelsternhaufen. Ein Blick auf Abb. II.7.1 zeigt, dass alle jüngst mit SDSS entdeckten Zwerggalaxien, die sich bei Entfernungen jenseits von 100 000 Lichtjahren befinden, an der Nachweisgrenze liegen. Dies verdeutlicht die enormen Anstrengungen, die nötig sind, um die lichtschwachen Zwerggalaxien in dem riesigen Datensatz aufzuspüren.

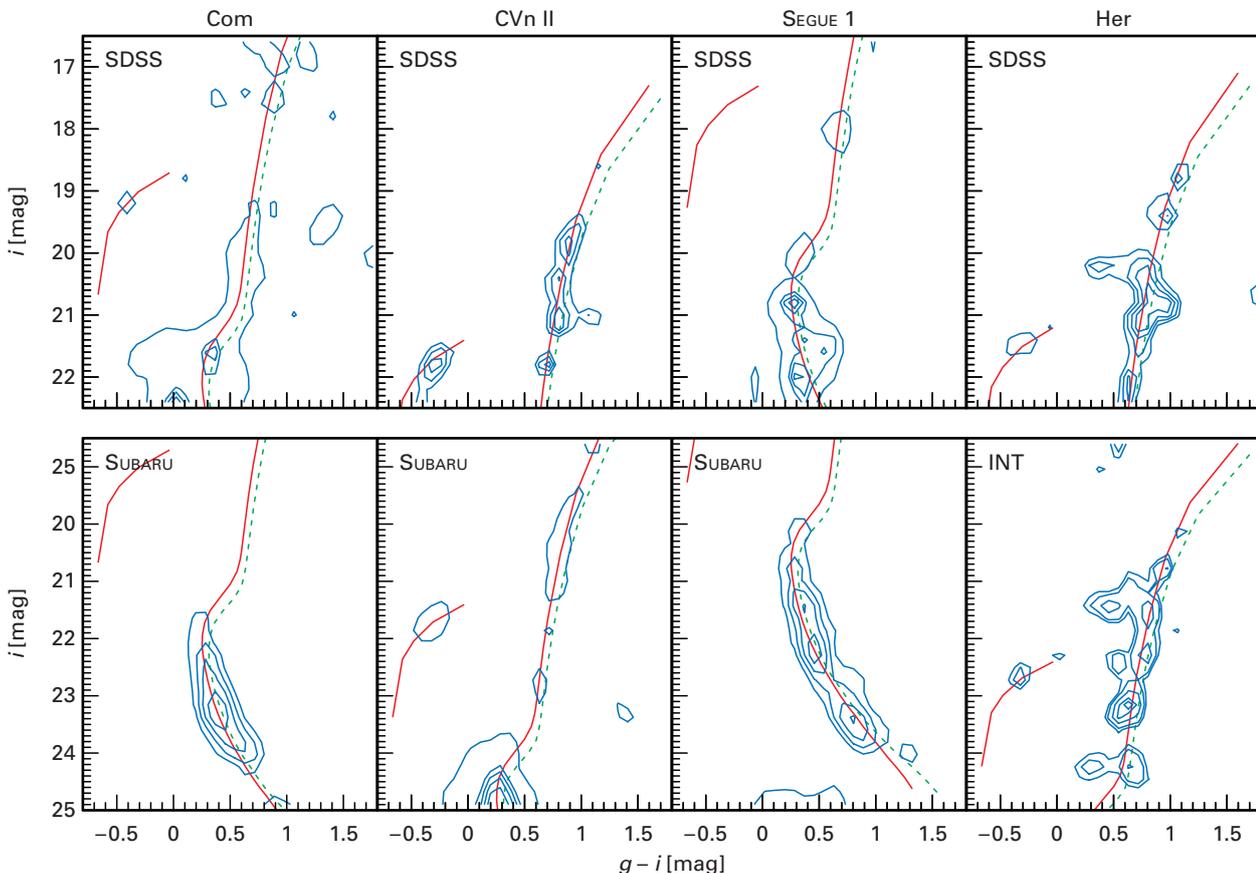
Vergleich mit Modellen und das Problem der fehlenden Satelliten

Mit diesen neun Objekten ließ sich nun auch eine Leuchtkraftfunktion (also die Anzahl der Objekte pro Helligkeitsbereich) für Zwerggalaxien bestimmen und mit theoretischen Vorhersagen vergleichen. Insbesondere konnte nun erstmals die Verteilung lichtschwacher Objekte ermittelt werden.

In Abb. II.7.3 sind diese volumenkorrigierten Daten für eine maximale Entfernung von 900 000 Lichtjahren aufgetragen. Die mit einer durchgezogenen Linie verbundenen offenen Kreise zeigen diese Verteilung bei der üblicherweise verwendeten Grenzgröße $r = 22.0$ mag, die Daten der gestrichelten Kurve gelten für die Grenzgröße $r = 22.5$ mag, bei der eine stärkere Korrektur nötig war. Die rote und blaue Linie zeigen die Ergebnisse von zwei theoretischen Modellen, die beide voraussetzen, dass im jungen Universum Sternentstehung in Satellitenhalos wegen starker UV-Strahlung unterdrückt war. Die ausgefüllten Kreise stehen für die bekannten hellen Zwerggalaxien des Milchstraßensystems und der Andromedagalaxie. Sie ergänzen die Leuchtkraftfunktion zu großen Helligkeiten.

Es wird deutlich, dass die Modelle die Realität nicht ausreichend beschreiben: Das eine Modell überschätzt die Zahl der lichtschwachen Satellitengalaxien (blaue Kurve), während das andere die Zahl der lichtstarken unterschätzt (rote Kurve). Es bedarf also noch weiterer Anstrengungen, um für die Zwerggalaxien ein konsistentes Modell zu erstellen. Der beobachterische

Abb. II.7.5a: Konturdarstellungen der Farben-Helligkeits-Diagramme. *gepunktete Linie:* Daten der beiden Kugelsternhaufen M92 und M13.



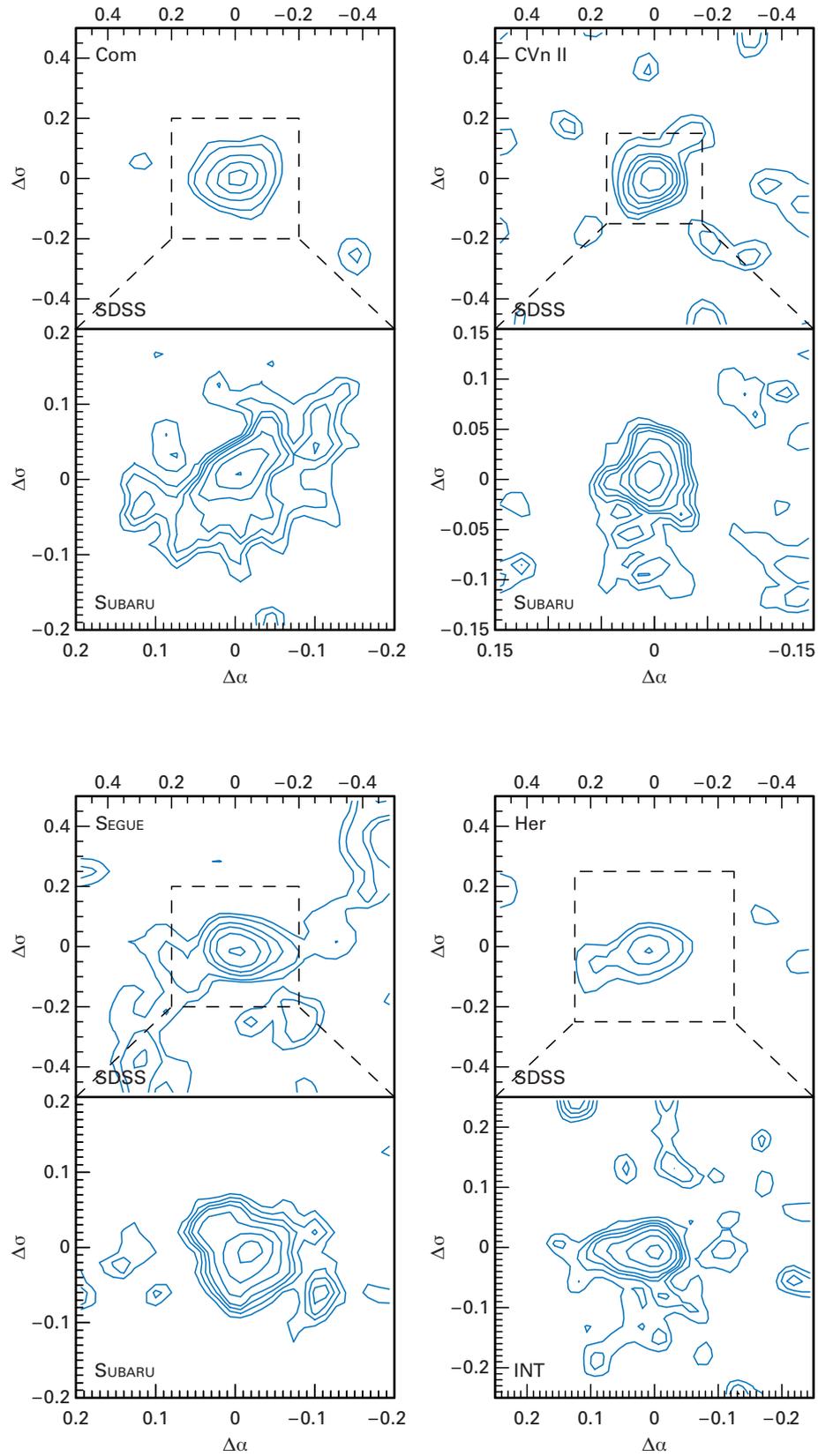


Abb. II.7.5b: Sternverteilung der angegebenen Objekte, abgeleitet aus den SDSS-Daten (*oben*) beziehungsweise auf den Aufnahmen mit SUBARU (*unten*).

Fortschritt in Richtung lichtschwacher Zwerggalaxien ist jedoch bedeutend. Er erlaubt erstmals einen Vergleich der Modelle mit Beobachtungen dieser Satellitensysteme.

Das »missing satellite problem« erscheint indes im Lichte der neuen Entdeckungen nicht mehr so brisant. Mit dem SDSS wurden bislang insgesamt acht neue Zwerggalaxien entdeckt. Da der Survey nur ein Fünftel des gesamten Himmels umfasst, kann man also von 40 potenziell vorhandenen Satellitensystemen ausgehen, zu denen die neun bereits zuvor bekannten Objekte hinzukommen. Mit einer Gesamtzahl von 50 Satellitensystemen kommt die Beobachtung den Modellen bereits recht nahe, zumal es jenseits der Nachweisgrenze des SDSS noch viele lichtschwächere Systeme geben kann.

Nachbeobachtung der Zwerggalaxien und des neuen Kugelsternhaufens

Die Astronomen beobachteten die neu entdeckten Zwerggalaxien (mit Ausnahme von Leo IV) eingehend mit dem SUBARU-Teleskop auf Hawaii und mit dem Isaac-Newton-Teleskop (INT) auf La Palma. Abb. II.7.4 zeigt in der ersten Spalte die SDSS-Aufnahmen der entsprechenden Objekte sowie die Positionen der SUBARU- und INT-Felder. Die zweite Spalte zeigt die mit einem Kernel von 4' gefilterten Aufnahmen. Die gestrichelten Kreise geben jene Bereiche an, in denen die Farben-Helligkeits-Diagramme von Sternen erstellt wurden. Kon-

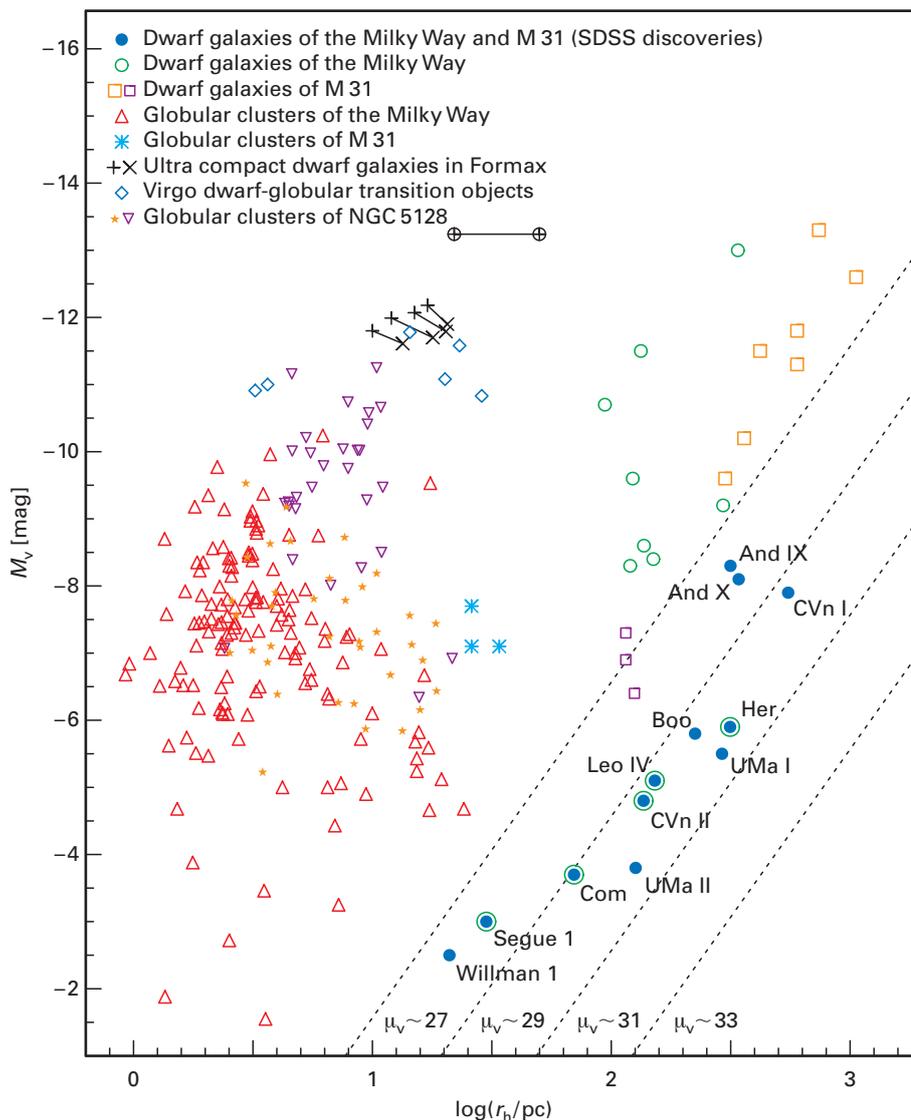


Abb. II.7.6: Vergleich der Absoluthelligkeiten und Größen unterschiedlicher Satellitensysteme. Die Symbole stehen für folgende Objekte: *offene und ausgefüllte Kreise:* Zwerggalaxien unserer Milchstraße, *offene und ausgefüllte Quadrate:* Kugelsternhaufen der Andromedagalaxie, *Dreiecke:* Kugelsternhaufen unserer

Galaxis, *Sterne (dünn und ausgefüllt) und umgekehrte Dreiecke:* Kugelsternhaufen der Andromedagalaxie und der elliptischen Galaxie NGC 5128, *Pluszeichen und Kreuze:* ultrakompakte Zwerggalaxien in Fornax.

turdarstellungen der Farben-Helligkeits-Diagramme sowie der Sternverteilung sind in Abb. II.7.5.a/b wiedergegeben. Die daraus gewonnenen Eigenschaften fasst Tab. II.7.1 zusammen.

Objekt	Distanz [kpc]	Radius [pc]	Elliptizität
Com 3.m7	44	70	0.5
CVn II	150	140	0.3
Her	140	320	0.5
Leo IV	160	160	0.25
SEGUE 1	23	30	0.3

Interessant ist in diesem Zusammenhang ein Vergleich der Absolutelligkeiten und Größen unterschiedlicher Satellitensysteme (Abb. II.7.6). Auffällig ist eine Zweiteilung der Objekte. So gibt es eine Lücke zwischen Objekten mit Radien von 40 pc (130 Lj) und 100 pc (320 Lj). Diese Lücke scheint durchaus real und nicht beobachtungstechnisch bedingt zu sein, denn mit dem neuen SDSS-Survey hätten Objekte in diesem Zwischenbereich gefunden werden müssen. Diese Lücke trennt vor allem Kugelsternhaufen von Zwerggalaxien: Bei einer gegebenen absoluten Leuchtkraft sind Kugelsternhaufen kompakter als Zwerggalaxien. Eine Lücke zwischen diesen beiden Objektklassen könnte ein Anzeichen dafür sein, dass es zwischen diesen beiden Klassen von Sternsystemen keinen ursächlichen entwicklungsphysikalischen Zusammenhang gibt. Hierfür spricht auch die Tatsache, dass alle Objekte links von der Lücke keine Anzeichen für größere Mengen an Dunkler Materie aufweisen, während die Zwerggalaxien, so weit bekannt, von ihr dynamisch dominiert werden.

Allerdings liegen noch keine Spektren der neu entdeckten Zwerggalaxien vor, so dass über deren dynamische Eigenschaften und den Gehalt an Dunkler Materie nichts bekannt ist. Spektroskopische Daten sind auch deshalb bedeutsam, weil es eine zweite Erklärungsmöglichkeit für die Zwerggalaxien gibt: Sie könnten Überreste einer Galaxie sein, die in früher Zeit mit unserem

Milchstraßensystem verschmolzen ist. In diesem Fall wären in den Zwerggalaxien keine großen Mengen an Dunkler Materie zu erwarten.

Deshalb sind spektroskopische Untersuchungen der neu entdeckten Zwerggalaxien dringend nötig. Sie geben Auskunft über den dynamischen Zustand der Sternsysteme und somit auch über deren Entstehungsgeschichte. Darüber hinaus beinhalten Spektren Informationen über den Gehalt an schweren Elementen. Die bislang bekannten galaktischen Zwerggalaxien sind sehr »metallarm«. Dies deutet darauf hin, dass sie zu der alten Komponente der Milchstraße gehören, die in deren Halo entstanden ist, so wie es das hierarchische Entstehungsszenario voraussagt. Die weiteren Untersuchungen müssen zeigen, ob dies für die jüngst entdeckten extrem lichtschwachen Zwerggalaxien gilt. Die gute Übereinstimmung der FHD mit denen von M 92 und M 13 deutet bereits darauf hin.

Schließlich zeigt Abb. II.7.6 noch ein weiteres bedeutendes Detail: Die gestrichelten Linien geben die Lage der Objekte konstanter Flächenhelligkeit μ in diesem Diagramm an; μ ist die Flächenhelligkeit in Größenklassen pro Quadratbogensekunde. Alle Objekte mit $\mu > 27$ mag wurden im Rahmen des SDSS gefunden – dies demonstriert einmal mehr die Stärke und die Bedeutung dieser Himmelsdurchmusterung.

Sergej Kopolov, Hans-Walter Rix, Eric F Bell

In Zusammenarbeit mit:

University of Cambridge (UK),

University of Hawaii,

Los Alamos National Laboratory,

Austin Peay State University,

The Johns Hopkins University,

Rensselaer Polytechnic Institute,

Louisiana Technical University,

Fermi National Accelerator Laboratory,

Lick Observatory, Ohio State University,

Pennsylvania State University,

Michigan State University,

Apache Point Observatory,

SUBARU Telescope, Gemini Observatory (all in the USA),

Mt. Suhora Observatory, Krakau

Sternberg Astronomical Institute, Moskau

II.8 Einzigartige Galaxienportraits mit THINGS

Unter der Leitung des MPIA untersuchte ein internationales Astronomenteam insgesamt 34 nahe Galaxien im Licht der 21-cm-Linie des atomaren Wasserstoffs mit dem Very Large Array, einem Radiointerferometer bei Socorro (New Mexico). Das Projekt mit der Bezeichnung »The HI Nearby Galaxy Survey« (THINGS) war das bislang größte Programm dieser Art am VLA. Es lieferte ein in vielerlei Hinsicht einzigartiges Datenmaterial, das noch für lange Zeit die Grundlage zahlreicher systematischer Untersuchungen sein wird. In einer ersten Serie von Veröffentlichungen untersuchten Astronomen des MPIA gemeinsam mit Kollegen anderer Institute das Rotationsverhalten von Spiral- und Zwerggalaxien, um mehr über die rätselhaften Halos aus Dunkler Materie zu erfahren. In einer weiteren Arbeit studierten sie den Zusammenhang zwischen der Dichte der interstellaren Materie und der Sternentstehung.

Beobachtungen im Bereich der 21-cm-Linie des atomaren Wasserstoffs (HI) gelten seit Jahrzehnten als eine der besten Möglichkeiten, die Struktur und Kinematik des interstellaren Mediums zu studieren – sowohl in unserem Milchstraßensystem als auch in anderen Galaxien. Gegenüber anderer Strahlung hat sie eine Reihe von Vorteilen. So erfährt die HI-Emission keine Extinktion durch interstellaren Staub, sie ist in fast allen Fällen optisch dünn, so dass man aus ihrer Intensität unmittelbar die Dichte des Wasserstoffgases ableiten kann. Außerdem lässt sich die Kinematik des Wasserstoffgases über den Doppler-Effekt ermitteln.

Auswahl der Galaxien für THINGS

Wegen der vergleichsweise großen Wellenlänge benötigt man aber große Teleskopaperturen, um eine ausreichend hohe Auflösung zu erzielen. Das VLA-Interferometer (Abb. II.8.1) bietet diesbezüglich einzigartige Möglichkeiten. Für THINGS arbeitete das VLA in drei unterschiedlichen Konfigurationen mit Basislängen zwischen 35 m und 11,4 km. Von entscheidender Bedeutung für das Projekt war eine hohe spektrale Auflösung zwischen 1,3 und 5,2 km/s und eine hohe räumliche Auflösung von 6 Bogensekunden. Damit waren die Astronomen mit dem VLA bis an die Grenze des technisch Machbaren gegangen.

Das wesentliche Ziel von THINGS ist die Untersuchung von Schlüsseigenschaften der Galaxien über die gesamte Hubble-Sequenz hinweg (ausgenommen Starburst-Galaxien). Hierbei stehen insbesondere die Galaxienmorphologie, Sternentstehung und -entwicklung sowie die Massenverteilung im Mittelpunkt des Interesses (vgl. Jahresbericht 2005, S. 82).

Die Auswahl der Galaxien erfolgte nach mehreren Kriterien. Sie unterscheiden sich in ihren Sternentstehungsraten, absoluten Leuchtkräften und Metallizitäten. Fast alle Galaxien gehören zum Katalog des Projekts

Abb. II.8.1a: Mit dem VLA in Socorro (New Mexico) wurden 34 nahe Galaxien im Licht der 21-cm-Linie des atomaren Wasserstoffs kartiert (Bild: NRAO/AUI).



SPITZER Infrared Nearby Galaxies Survey (SINGS), an dem das MPA ebenfalls beteiligt ist. Das NASA-Weltraumteleskop SPITZER ist das bislang leistungsfähigste Infrarotobservatorium. Mit SINGS werden die Staubeigenschaften von Galaxien im nahen und mittleren Infrarot untersucht. Gleichzeitig liegen für viele der THINGS-Galaxien Beobachtungen des amerikanischen UV-Weltraumteleskops GALEX sowie CO-Beobachtungen vor, die mit den IRAM-Teleskopen erzielt wurden. Daraus lassen sich Sternentstehungsraten ermitteln und mit den Eigenschaften des neutralen Wasserstoffgases vergleichen (s.u.). Alle diese Beobachtungsdaten besitzen etwa dieselbe Winkelauflösung von 6 Bogensekunden und sind deshalb sehr gut miteinander vergleichbar.

Für die Auswahl der Galaxien gab es noch weitere Kriterien. So liegen alle in einem Entfernungsbereich von 6 bis 50 Millionen Lichtjahren, woraus sich eine räumliche Auflösung von 300 bis 1600 Lichtjahren ergab, die deutlich besser ist als die früherer Beobachtungen. Galaxien aus der Lokalen Gruppe wurden ausgeschlossen, weil sie eine zu große Winkelausdehnung am Himmel besitzen. Ausgewählt wurden schließlich 34 Galaxien, für deren detailliertes Studium im Lichte der 21-cm-Linie insgesamt 500 Stunden Beobachtungszeit erforderlich waren (Abb. II.8.2). Im Folgenden stellen wir zwei publizierte Ergebnisse vor.

Rotationskurven und Modelle für Dunkle-Materie-Halos

Seit den 1970er-Jahren mehren sich die Hinweise darauf, dass Galaxien in ausgedehnten Wolken (Halos) von Dunkler Materie eingebettet sind. Erkennbar wurde dies an den Rotationskurven der Galaxien. Würden die Galaxien ausschließlich aus der sichtbaren Materie bestehen, so würden die Körper und Gaswolken auf Kepler-Bahnen um das Zentrum kreisen, auf denen die Bahngeschwindigkeit mit wachsendem Abstand vom Zentrum abnimmt. Beobachtet wird jedoch ab einem bestimmten Radius eine nahezu konstante Geschwindigkeit bis in die Randbereiche der Galaxien hinein. Auch unser Milchstraßensystem besitzt eine solche Rotationskurve. Dies erklärt man mit der Gravitationswirkung des Halos aus Dunkler Materie.

Diese Dunkle Materie muss bereits bei der Entstehung der Galaxien eine entscheidende Rolle gespielt haben. Sie bildete im frühen Universum Potentialtöpfe, in denen sich die normale, baryonische Materie sammelte und weiter zu den Galaxien verdichtete. Moderne Computersimulationen berücksichtigen die Gravitationswir-

Abb. II.8.1b: Luftansicht des Very Large Telescope (VLA) in New Mexico.



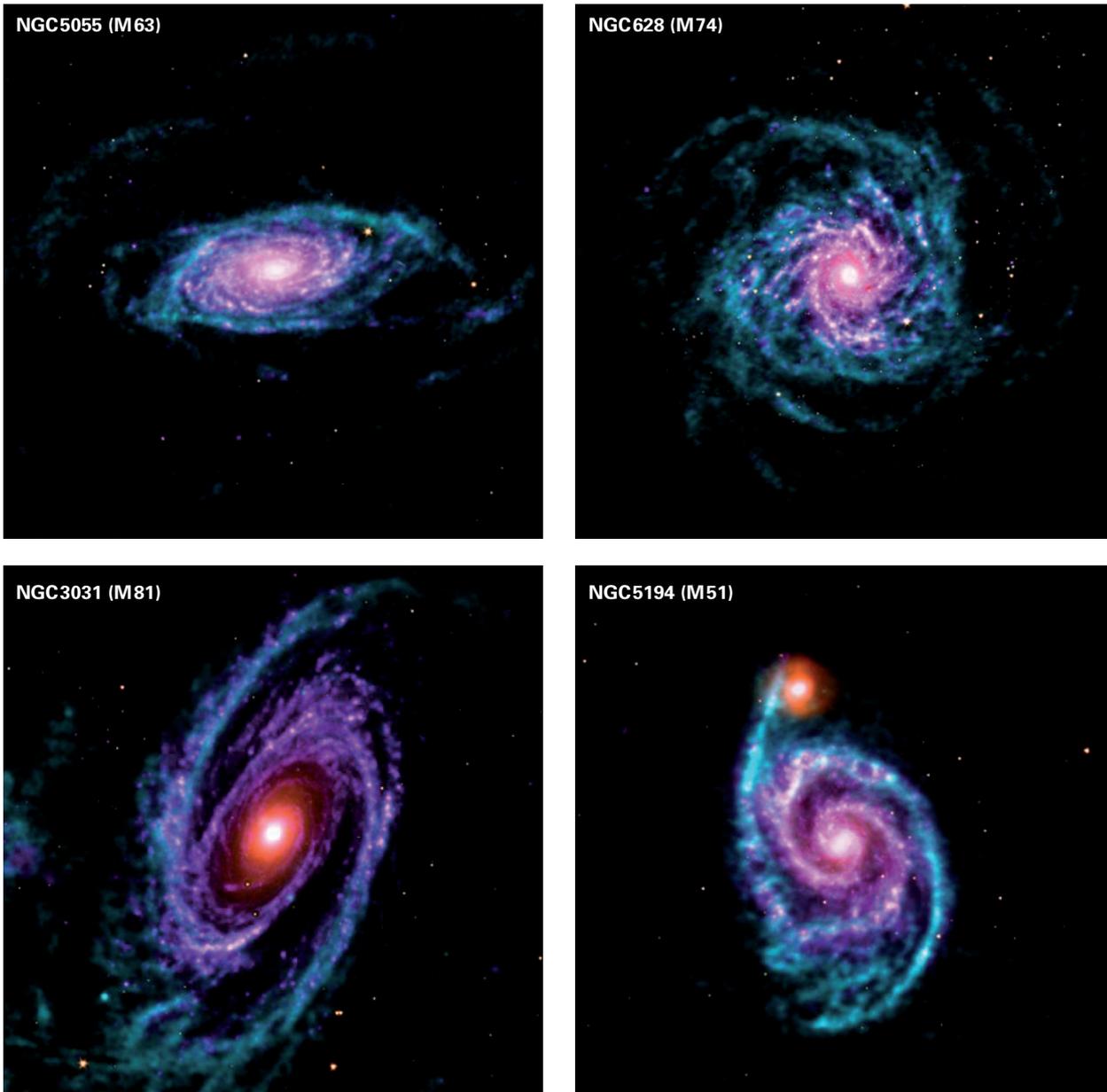
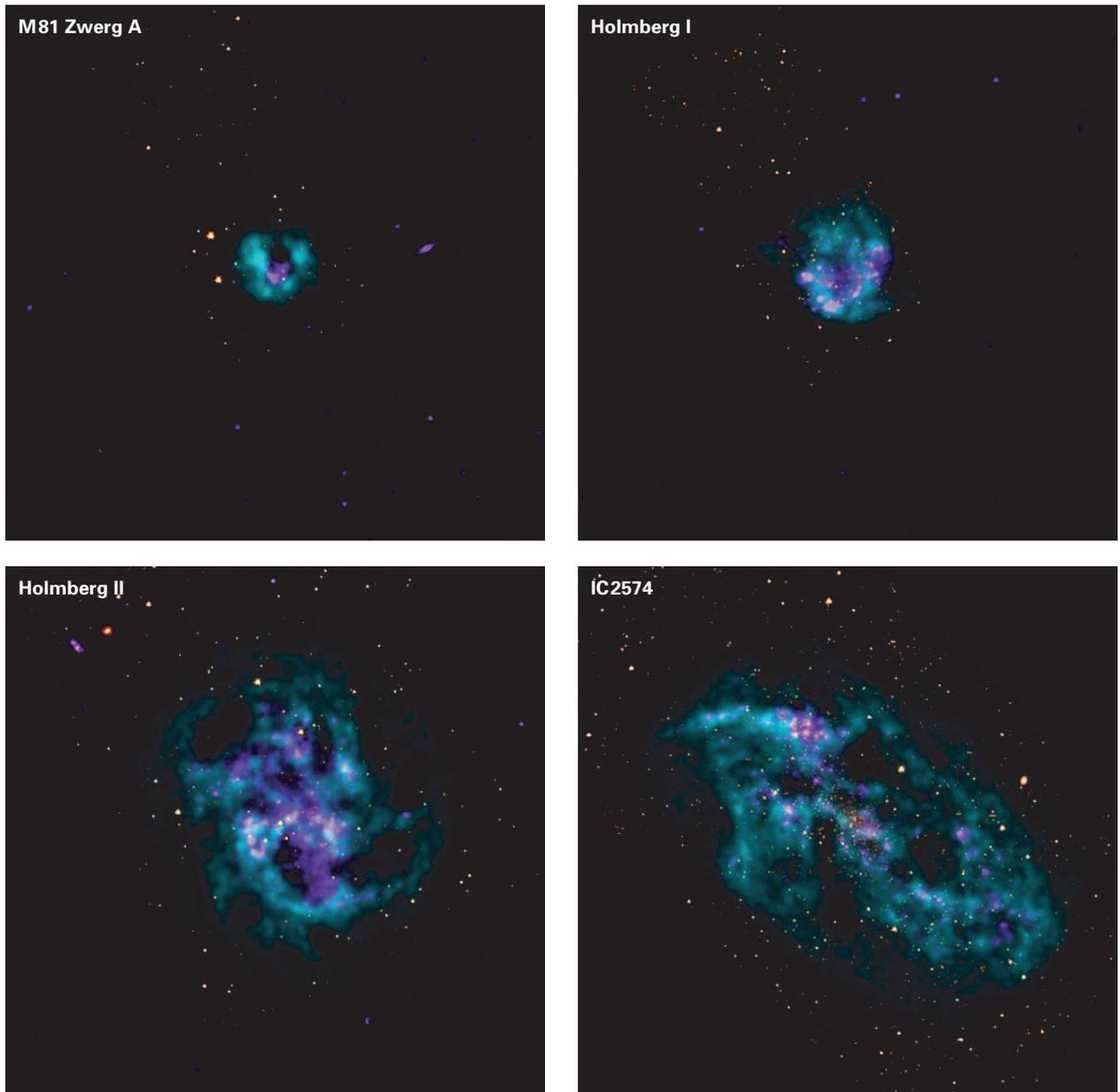


Abb. II.8.2a: Einige Beispiele für die im Rahmen von Things beobachteten Galaxien. Oben sind vier Spiralgalaxien gezeigt, auf der nächsten Seite vier Zwerggalaxien. Die Radiokarten sind blau kodiert, ihnen überlagert sind Aufnahmen im Infraroten (gelb kodiert, sie zeigen die Verteilung der alten Sterne) und eine Kombination aus Infrarot und Ultraviolett (violett kodiert, sie zeigen die Verteilung der Sternentstehungsgebiete).

kung der Dunklen Materie, deren weitere physikalische Eigenschaften sind allerdings weitgehend unbekannt. In jüngster Zeit kristallisierte sich bei diesen kosmologischen Rechnungen ein Problem heraus: Die Theorie sagt voraus, dass die Dichte und damit auch das Gravitationspotential eines Halos aus Dunkler Materie zum Zentrum hin sehr steil (mit r^{-1} bis $r^{-1.5}$) anwachsen

sollte. Man nennt dieses Modell *cuspy core* (zu Deutsch etwa: spitzer Kern). Rotationskurven von Galaxien lassen sich aber am besten mit einer nur moderat ausgebildeten Zentraldichte erklären. Demnach ist die Dichte des Halos aus Dunkler Materie im Zentralbereich nahezu konstant oder nimmt nur leicht zum Mittelpunkt zu. Man spricht hier vom *soft core* (weicher Kern).

Die bisherigen Rotationskurven der Galaxien wurden zum Teil mit HI-Beobachtungen gewonnen. Diese hatten jedoch oft den Nachteil, dass deren räumliche Auflösung von mindestens 3200 Lichtjahren relativ grob war, und auch die Geschwindigkeitsauflösung war gering. Deswegen sahen einige Astronomen die Möglichkeit, dass in den Zentralgebieten nichtzirkulare Bewegungen auftreten, die von den Beobachtungen nicht richtig erfasst werden und die Messwerte im Kernbereich verschmie-



ren. Die Daten würden dann einen »weichen Kern« vortäuschen, obwohl in Wahrheit ein »spitzer Kern« vorliegt.

Ein Team um Erwin de Blok von der University of Cape Town (Südafrika) und Fabian Walter vom MPIA nutzte nun die THINGS-Daten, um diesem Problem nachzugehen. Denn ihre Messwerte besaßen endlich eine ausreichende räumliche und spektrale Auflösung, um nicht-zirkulare Anteile in der Bewegung von Gaswolken zu erkennen.

Für ihre Untersuchung mussten sie jedoch die Liste der THINGS-Galaxien einschränken. Der Neigungswinkel der Galaxien gegen die Sichtlinie musste zwischen etwa 40 und 80 Grad liegen. Blickt man nämlich fast senkrecht auf die Scheibe, so bewegt sich das Gas ebenfalls fast senkrecht zur Beobachtungsrichtung, und die Korrekturen

Abb. II.8.2b: Vier im Rahmen von THINGS beobachtete Zwerggalaxien. Die Kodierung der Bilder ist wie in Abb. II.8.2.a.

an den gemessenen Radialgeschwindigkeiten werden zu groß. Schaut man hingegen nahezu auf die Kante, so durchquert der Sehstrahl einen zu großen Tiefenbereich der Galaxie, wodurch sich zu viele Geschwindigkeitsbereiche überlagern. Übrig blieben 19 Galaxien mit mittleren Neigungen, zu denen die große Spiralgalaxie M 81 ebenso gehört wie die Zwerggalaxie IC 2574 (Abb. II.8.2).

Die Astronomen bestimmten aus der Doppler-Veränderung der 21-cm-Linie die Rotationskurven der Galaxien. Hierfür stehen im Prinzip mehrere Verfahren

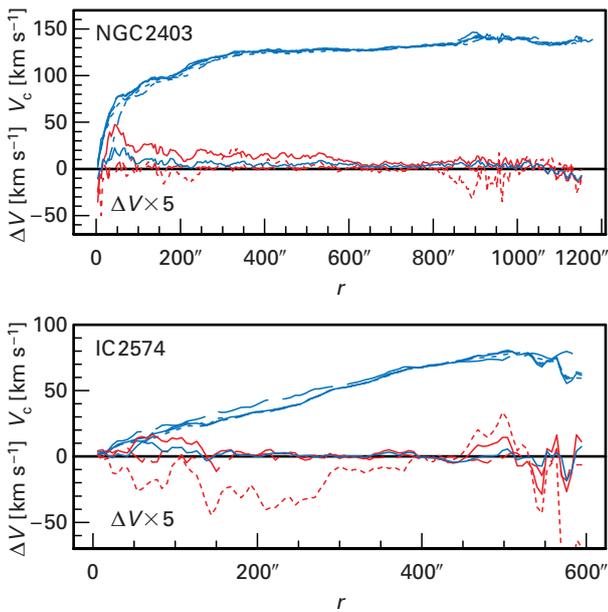


Abb. II.8.3: Diese beiden Rotationskurven (blau) verdeutlichen, wie stark sich die ermittelten Radialgeschwindigkeiten je nach angewandter Methode unterscheiden; *oben*: die rotationsdominierte Galaxie NGC 2403, *unten* IC 2574, in der stark asymmetrische Linienprofile auftreten.

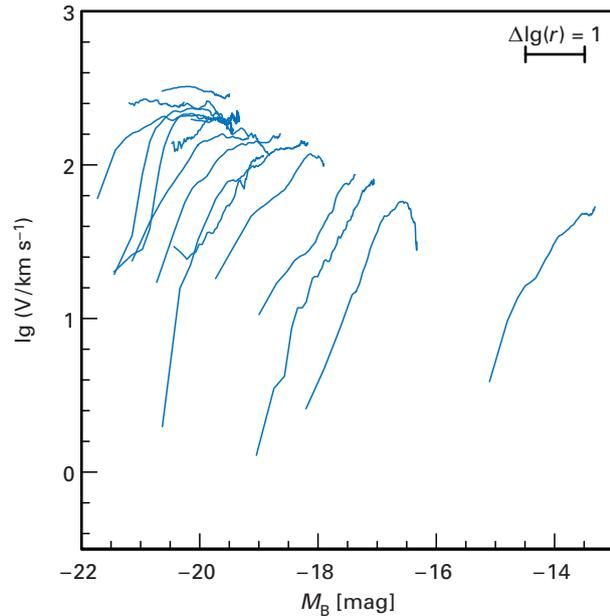


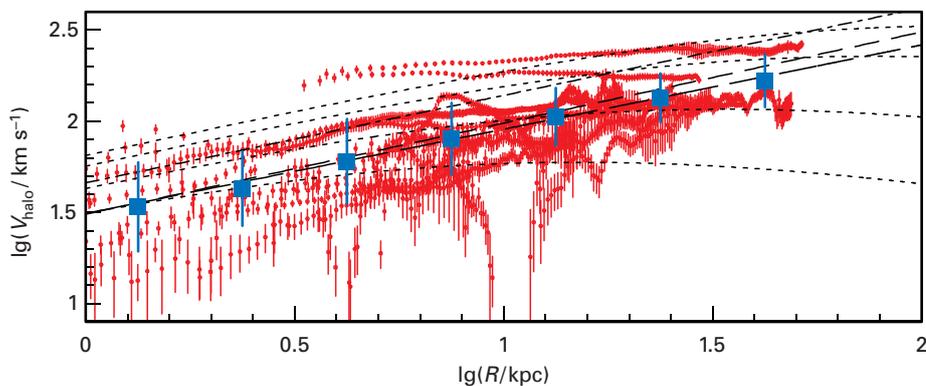
Abb. II.8.4: Die Rotationskurven aller Galaxien, sortiert nach absoluter Leuchtkraft der Galaxien, mit logarithmischer Darstellung der Rotationsgeschwindigkeit.

zur Verfügung. So kann man beispielsweise einfach das Maximum der Linie bestimmen oder an die Linie eine Gauss-Kurve anpassen. Alle Verfahren haben jedoch Schwierigkeiten, wenn die Linienform zum Beispiel wegen des Einflusses nichtzirkularer Bewegungen asymmetrisch ist. Das Team um de Blok und Walter entschied sich deshalb für eine Anpassung der 21-cm-Linie mit Hilfe eines sogenannten Gauß-Hermite-Polynoms, das eine gewisse »Schiefe« (skewness) des Linienprofils zulässt. Abb. II.8.3 zeigt, wie stark sich die Anwendung der unterschiedlichen Methoden auf die Geschwindigkeitsbestimmung auswirkt.

Die THINGS-Galaxien überdecken einen großen Bereich in der Leuchtkraft der Hubble-Sequenz. Dies äußert sich in einer Vielzahl unterschiedlicher Rotationskurven, wie

Abb. II.8.4 demonstriert. Diese wurden so angeordnet, dass die Position des Ursprungs an die absolute Helligkeit M_B angepasst wurde. Hierbei wird deutlich, dass die Rotationskurven heller Galaxien schnell ansteigen und sich dann mit wachsendem Abstand vom Kerngebiet einem konstanten Wert annähern. Die Kurven lichtschwacher Galaxien steigen langsamer an und erreichen innerhalb des des HI-Gebietes kein konstantes Niveau.

Abb. II.8.5: Rotationskurven der untersuchten Galaxien. THINGS-Messwerte (*rot*), deren Mittelwerte (*blaue Quadrate*), kosmologische Modelle (*gepunktete Kurven*), sowie Werte einer theoretischen Arbeit von S. S. McGaugh et al. aus dem Jahre 2007 (*obere gepunktete Kurven*).



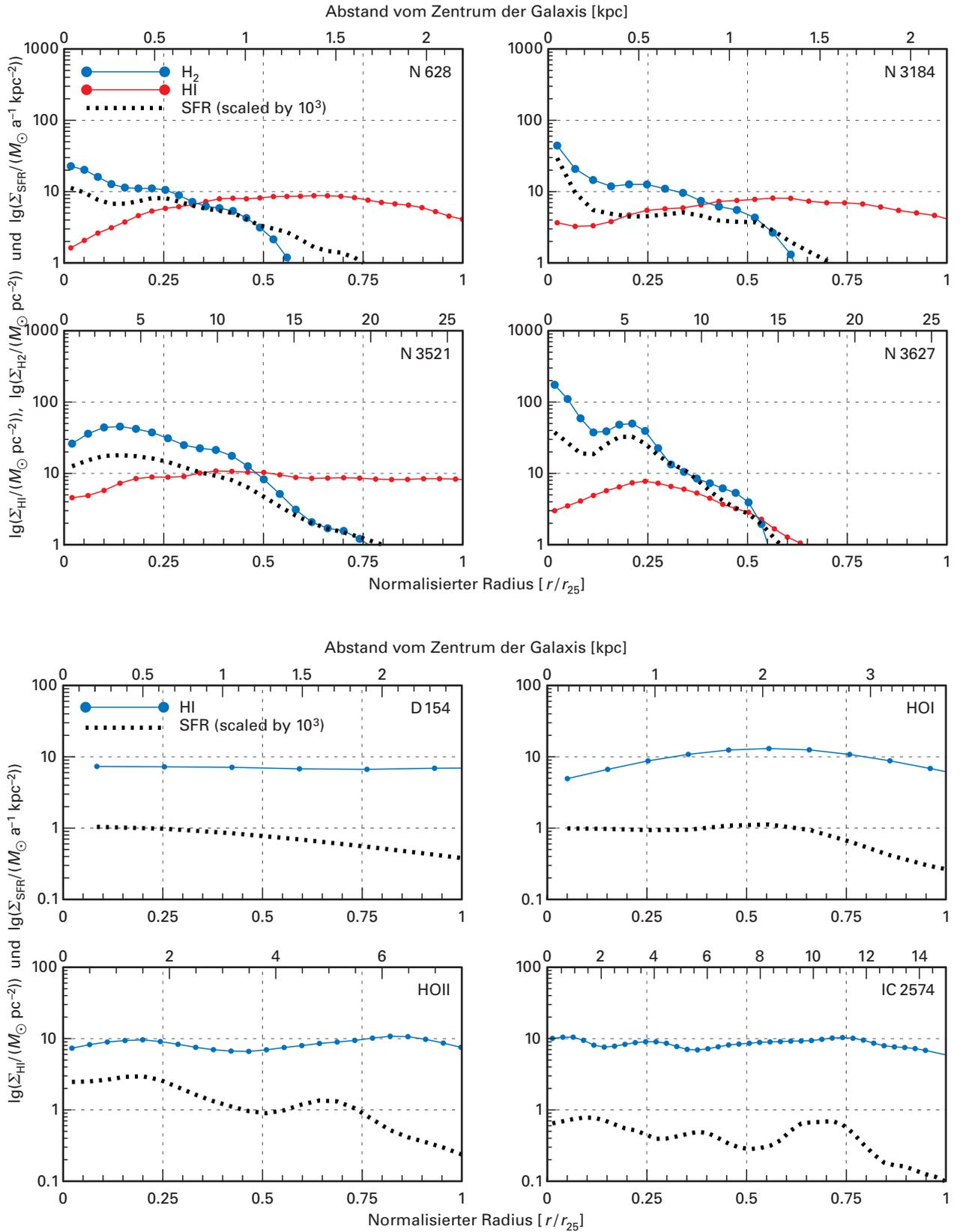


Abb. II.8.6: Azimutal gemittelter, radialer Verlauf der Flächen-
dichte Σ von HI und H_2 sowie der Sternentstehungsrate SFR,
oben: in Spiralgalaxien mit H_2 -dominierten Zentralgebieten,

unten: in HI-dominierten Galaxien (leuchtschwache Spiral-
und Zwerggalaxien).

Aus den gemessenen Rotationskurven konnten Massenmodelle der Galaxien inklusive Dunkler Materie erstellt und diese mit den baryonischen Massen, die sich aus den SPITZER-Daten ableiten ließen, in Beziehung gesetzt werden. Hierbei wurde klar, dass bei hellen Galaxien der Einfluss der Dunklen Materie mit wachsendem Radius zunimmt, aber das Verhältnis von Dunkler zu baryonischer Materie nie so groß wird wie bei den leuchtschwachen Galaxien. Leuchtstarke Galaxien werden also nicht so stark von Dunkler Materie dominiert wie leuchtschwache, insbesondere Zwerggalaxien. Bei Letzteren macht die Dunkle Materie teilweise über 90 Prozent der Gesamtmaterie aus.

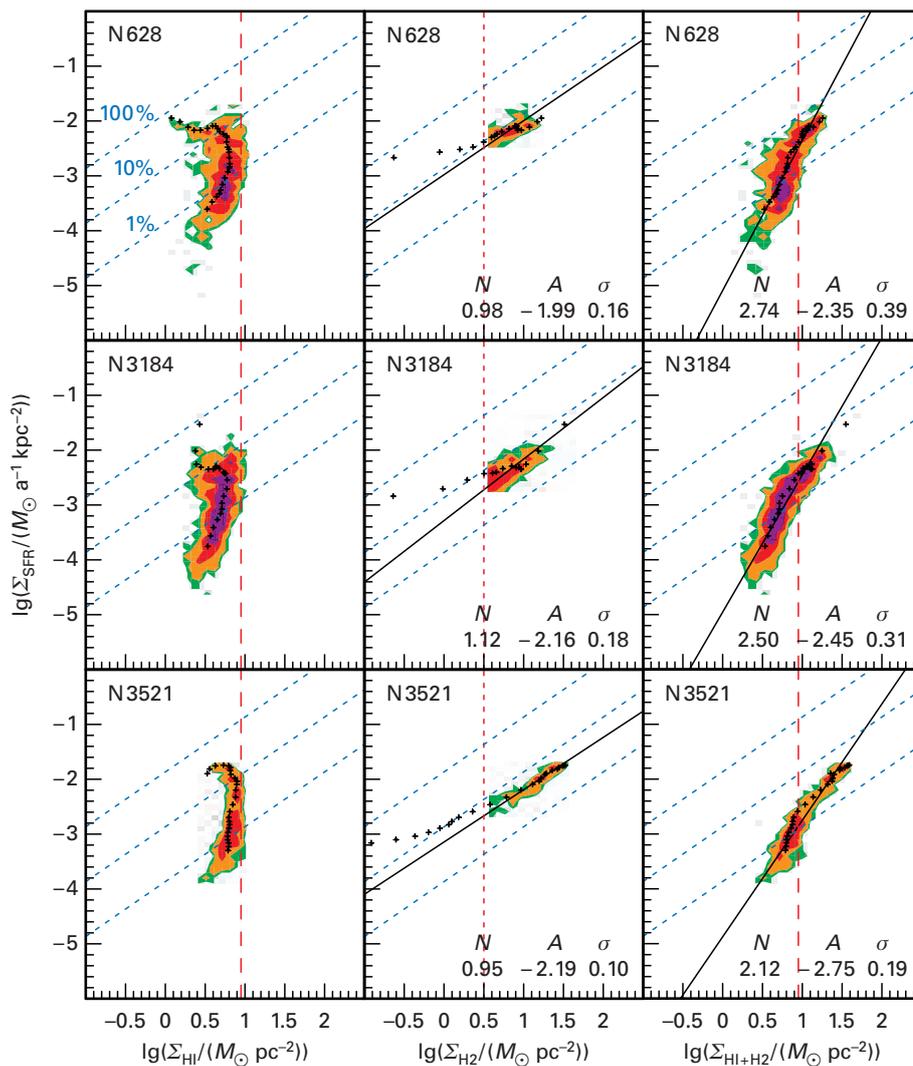
Mit den vorhandenen Daten ging die Gruppe nun auch die Frage nach der Massenverteilung der Dunklen Materie an. Ist es möglich, zwischen dem kosmologischen

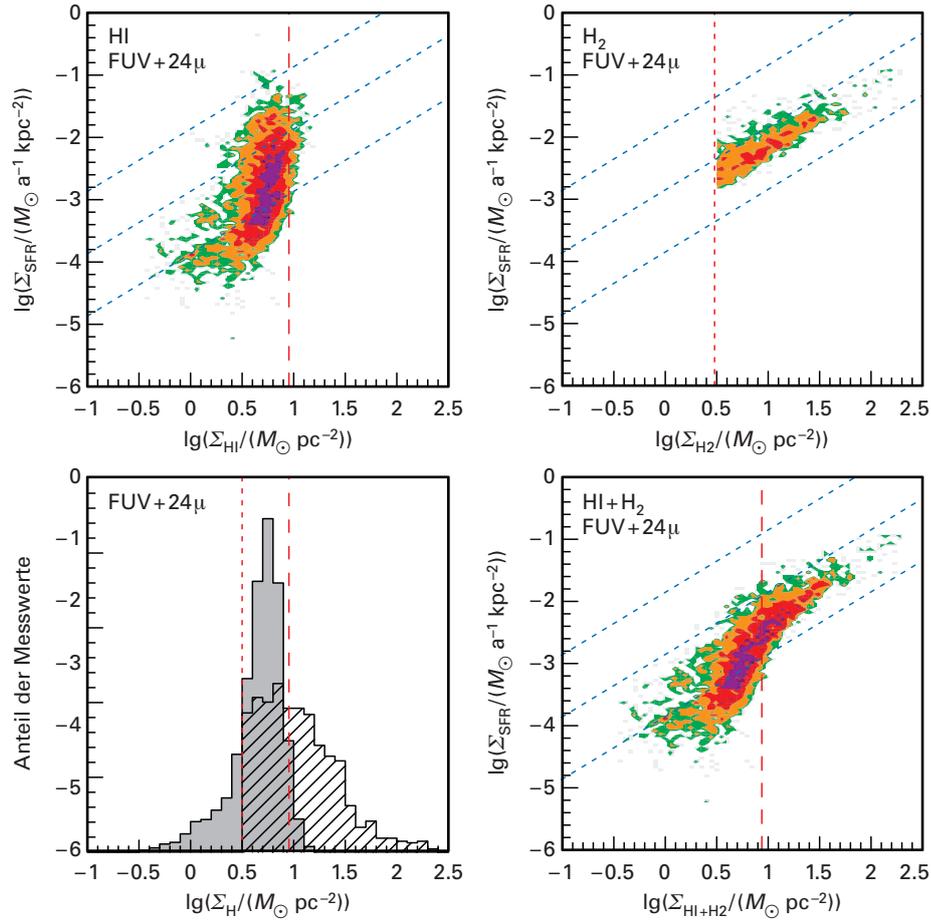
Cuspy-core-Modell und dem durch Beobachtungen motivierten Soft-core-Modell zu unterscheiden?

Abb. II.8.5 zeigt alle Rotationskurven (grau) sowie eine gemittelte Kurve (schwarze Quadrate). Außerdem sind (gestrichelt) die Ergebnisse von mehreren kosmologischen Modellen eingetragen. Alle theoretischen Kurven fallen zu größeren Radien hin ab, während die gemessenen Kurven dies nicht tun. Die Dichte der empirisch bestimmten Halos aus Dunkler Materie ist im Mittel etwa um einen Faktor zwei geringer als die theoretisch erwartete. Außerdem geben alle Modelle für die Zentralbereiche stets zu hohe Geschwindigkeiten an. Theorie und Beobachtung passen also nicht zusammen.

Die Astronomen konnten damit die bis dahin noch mögliche Erklärung ausräumen, dass die stets beobachteten »weichen Kerne« durch nicht ausreichend aufgelöste Beobachtungen vorgetäuscht sind. Die THINGS-Daten haben ausreichende räumliche und spektrale Auflösung, um diesen Effekt auszuschließen. Somit besteht nach wie vor eine erhebliche Diskrepanz zwischen den kosmologischen Simulationen von Halos Dunkler Materie und der Wirklichkeit.

Abb. II.8.7: Die Flächendichte der Sternentstehungsrate als Funktion der Flächendichte von HI, H₂ sowie deren Summe in Spiralgalaxien für drei Galaxien. Grüne, orangene, rote und magentafarbene Punkte stehen für jeweils 1, 2, 5, und 10 Datenpunkte.





Sternentstehung und Gasdichte

Ein entscheidender Faktor bei der Entwicklung einer Galaxie ist die in ihr stattfindende Sternentstehung. Eine quantitative Messung des Zusammenhangs zwischen Sternentstehungsrate (SFR) und Gasdichte (ρ) ist deshalb ein bedeutender Inputparameter für alle kosmologischen Modelle der Galaxienentwicklung. Schon 1959 stellte Maarten Schmidt für das Milchstraßensystem die Relation auf, wonach die Anzahldichte entstehender Sterne quadratisch mit der Gasdichte zunimmt. Schmidt stützte sich dabei auf Beobachtungen von HI-Gas. Nachfolgende Beobachtungen an anderen Galaxien, bei denen die Flächendichte des Gases bestimmt wurde, ergaben indes kein einheitliches Bild. Eine Fülle von Studien führte auf Potenzgesetze der Form $\text{SFR} \sim \rho^N$ mit $1 < N < 3$. Theoretische Untersuchungen legen für N Werte zwischen 0.75 und 2 nahe.

Unklar ist bis heute, ob es für alle Galaxien oder zumindest für jeden Galaxientyp ein universelles »Schmidt-Gesetz« gibt, oder ob unterschiedliche äußere Bedingungen die Relation zwischen Sternentstehungsrate und Gasdichte signifikant beeinflussen. Für Theorien und Modelle der Galaxienentwicklung ist diese Frage von großer Bedeutung.

Abb. II.8.8: Ergebnisse aller Spiralgalaxien. Deutlich zu erkennen ist die lineare Zunahme der Sternentstehungsrate mit der H₂-Dichte (*rechts oben*) und die Sättigungsgrenze für HI-Gas bei etwa zehn Sonnenmassen pro Quadratparsec (*links unten*).

Geht man dieser Frage experimentell nach, so erweist es sich als sinnvoll, zwischen der Dichte von atomarem (HI) und molekularem Gas (H₂) zu unterscheiden. THINGS eignet sich wegen der erreichten hohen räumlichen Auflösung und der homogenen Empfindlichkeit besonders gut. Ein Team um die MPIA-Astronomen Frank Bigiel, Adam Leroy und Fabian Walter diskutierte diese Frage unter Verwendung der Daten des GALEX Nearby Galaxy Survey und von SINGS. Aus ihnen ließ sich die Sternentstehungsrate ableiten. Außerdem standen CO-Beobachtungen mit dem 30-m-Teleskop von IRAM zur Verfügung, aus denen sich die Dichte des molekularen Wasserstoffs (H₂) ableiten ließ.

Abb. II.8.6 zeigt diese Ergebnisse a) für die Spiralgalaxien mit H₂-dominierten Zentralgebieten sowie b) für späte Spiral- und Zwerggalaxien. Die Werte sind in Abhängigkeit vom Radius und azimuthal gemittelt aufgetragen. Man erkennt, wie in den Spiralgalaxien Sternentstehungsrate und H₂-Dichte mit wachsendem Abstand abnehmen, während die HI-Dichte diesem Trend nicht

folgt. Bei den Zwerggalaxien ist diese radiale Abnahme der Sternentstehungsrate eindeutig nicht vorhanden.

In Abb. II.8.7 sind diese Messwerte für die Spiralgalaxien nun so aufgetragen, dass sich der Verlauf der SFR in Abhängigkeit von HI, H₂ sowie der gesamten Gasdichte HI+H₂ direkt vergleichen lässt. Zusätzlich geht eine weitere Größe, die sogenannte Sternentstehungseffizienz (SFE), in das Diagramm ein. Sie ist definiert als das Verhältnis der Dichte der Sternentstehungsrate zur Gasdichte und gibt an, in welcher Zeitspanne das interstellare Gas bei der derzeitigen Sternentstehungsrate verbraucht ist. Die diagonal verlaufenden, gepunkteten Geraden entsprechen von unten nach oben Verbrauchszeiten von 10¹⁰, 10⁹ und 10⁸ Jahren.

Das unterschiedliche Verhalten des HI- und H₂-Gases ist offensichtlich. Während die Sternentstehungsrate (SFR) ziemlich genau linear ($N = 1.02 \pm 0.12$) mit der Dichte des molekularen Wasserstoffs (H₂) steigt, bleibt die HI-Dichte innerhalb der Galaxien nahezu konstant. Interessanterweise knickt die Verteilung bei hohen Sternentstehungsraten sogar um. Bildet man die Summe HI + H₂, so ergeben sich sehr unterschiedliche Potenzgesetze mit Exponenten $1 < N < 2.9$. Oft lässt sich die Verteilung innerhalb einer Galaxie gar nicht mit einem einzigen Potenzgesetz beschreiben. Da dieses Verhalten sich von Galaxie zu Galaxie signifikant unterscheidet, muss man davon ausgehen, dass kein universeller Zusammenhang der SFR mit der gesamten Gasdichte (HI + H₂) besteht, wohl aber mit der H₂-Dichte.

Auch die Sternentstehungseffizienz zeigt kein einheitliches Verhalten. In den Zwerggalaxien ist sie nahezu konstant, während sie in Spiralgalaxien mit wachsendem Abstand vom Zentrum sinkt. In den Außenbereichen der Spiralgalaxien erreicht sie dann die für Zwerggalaxien typischen Werte.

Abb. II.8.7 lässt ein interessantes Verhalten des HI-Gases erkennen: Die Dichte überschreitet in keinem Fall einen Wert von etwa 10 Sonnenmassen pro Quadratparsec. Das gilt sowohl für große Spiralgalaxien als auch für Zwerggalaxien. Dieser Sättigungseffekt, der beim molekularen Wasserstoff nicht auftritt, ist etwas überraschend, denn von einigen Galaxien wurde vermutet, dass in ihnen die Umwandlung von atomarem in molekularem Wasserstoff nicht begünstigt wird. Hier sollten höhere Sättigungswerte erreicht werden. Das betrifft zum Beispiel Zwerggalaxien mit geringer Metallizität, in denen deshalb weniger Staub vorhanden ist. (Die Reaktion von zwei Wasserstoffatomen zu H₂ findet auf der Oberfläche von Staubkörnchen statt.)

In Abb. II.8.8 sind die Werte aller Spiralgalaxien zusammengetragen. Sehr klar tritt hier die Sättigungsgrenze zu Tage (links unten), die mittlere Verbrauchsdauer der Gasreservoirs beträgt zwei Milliarden Jahre (rechts oben).

Die neuen Beobachtungsdaten aus THINGS belegen somit eindeutig, dass die Sternentstehung direkt mit der Dichte des molekularen Wasserstoffs verknüpft ist. Der Übergang von atomarem zu molekularem Wasserstoff und die sich daran anschließende Sternentstehung ist keine reine Funktion der gesamten Gasdichte. Ganz offenbar bestimmen andere physikalische Einflüsse das Verhältnis von HI zu H₂.

Im Großen und Ganzen bestätigen die Daten die klassische Idee, wonach Sterne entstehen, wenn sich eine Molekülwolke unter dem Einfluss der Eigengravitation zusammenzieht. Ein einfaches Modell legt nahe, dass Sternentstehung dann nur oberhalb einer bestimmten Gasdichte einsetzt. In diesem Fall erwartet man eine lineare Korrelation der Sternentstehungsrate mit der H₂-Dichte, also einen Exponenten $N = 1$, wie es die neue THINGS-Studie nahelegt.

Dieses Ergebnis hat erhebliche Auswirkungen auf die Theorie der Entwicklung von Galaxien. Für den Exponenten N wird nämlich heute im Allgemeinen in den Modellen ein Wert von 1.4, also ein nichtlineares Verhalten, angenommen. Allerdings wurde dieser aus Mittelungen über ganze Galaxien bestimmt. Mit THINGS konnten nun zum ersten Mal Exponenten auf einer räumlichen Skala von weniger als 3200 Lichtjahren bestimmt werden. Und hier fand sich $N = 1$. Dies ist ein wichtiger Hinweis für die Theoretiker, die zukünftig in hochaufgelösten Evolutionsmodellen von diesem linearen Verhalten ausgehen müssen, was einen erheblichen Unterschied zu ihren derzeitigen Modellen macht.

Fabian Walter, Frank Bigiel, Adam Leroy

In Zusammenarbeit mit:

University of Hertfordshire, Hatfield (UK),

University of Cape Town, Rondebosch (Südafrika),

University of Cambridge, Cambridge (UK),

Bucknell University, Lewisburg (USA),

Mount Stromlo Observatory, Weston ACT (Australien),

Observatories of the Carnegie Institution of

Washington, Pasadena USA),

Ruhr-Universität Bochum

III. Ausgewählte Forschungsgebiete

III.1 Gas und Staub in nahen Galaxien

Die Kombination aus Durchmusterungen, die mit Weltraumteleskopen wie SPITZER und GALEX durchgeführt wurden, mit umfangreichen bodengebundenen Beobachtungsprogrammen hat unseren Blick auf nahe Galaxien in den letzten Jahren geschärft und erweitert. Forscher am MPIA nutzen diese neuen Daten, um das Zusammenspiel zwischen großräumigen Strukturen, dem interstellaren Medium und der Entstehung von Sternen in nahen Galaxien zu untersuchen. Zu den Höhepunkten des Jahres 2007 zählten: umfangreiche wissenschaftliche Erkenntnisse, die durch die vom MPIA geleitete HI-Durchmusterung naher Galaxien gewonnen wurden; erste mit dem Large Binocular Telescope erzielte wissenschaftliche Ergebnisse zur Charakterisierung des stellaren Feedbacks auf das Interstellare Medium und die Inangriffnahme eines neuen großen Beobachtungsprogramms zur Kartierung des molekularen Gasgehalts der Galaxien aus der THINGS-Stichprobe unter Verwendung des 30-m-Radioteleskops IRAM.

Studien naher Galaxien stellen eine einzigartige Nische in der astronomischen Landschaft dar. Sie verbinden detaillierte Kenntnisse der Entstehung von Sternen und des in der Milchstraße aufgebauten interstellaren Mediums (ISM) mit der Entwicklung von Galaxien, die anhand anspruchsvoller Beobachtungen an weit entfernten Galaxien und Objekten hoher Rotverschiebung untersucht wurde. Für die Überprüfung astrophysikalischer Theorien bieten diese eine eindeutige Geometrie und eine Vielfalt physikalischer Umgebungen, die in der Milchstraße nicht gegeben sind. Hinzu kommt ihre geringe Entfernung, die eine gute Empfindlichkeit und räumliche Auflösung bei vielen verschiedenen Wellenlängen ermöglicht.

In der Milchstraße wurden wichtige Fortschritte in der Erforschung der Sternentstehung aus Molekülwolken erzielt. Beobachtungen mit erheblich gesteigerter Auflösung und Empfindlichkeit bieten eine detaillierte Ansicht der nächstgelegenen Sternentstehungsgebiete. Astronomen können den Prozess der Sternentstehung bis ins Kleinste verfolgen und sogar Ausflüsse aus einzelnen jungen Sternen sowie die zirkumstellaren Scheiben, in denen Planeten entstehen können, abbilden. Karten der Staub- und Gasverteilung in Molekülwolken werden den Ursprung der stellaren Massenverteilung anhand der Unterstrukturen der Wolke verständlich machen.

Aufgrund unserer Stellung innerhalb der galaktischen Scheibe der Galaxis ist es bei lokalen Beobachtungen jedoch schwierig einen Überblick zu gewinnen. Die Pro-

zesse, durch die sich Molekülwolken bilden, wie lange diese leben, wie sie sich in verschiedenen Umgebungen verhalten, und die Auswirkungen der sich daraus ergebenden Sternbildung auf das ISM lassen sich in unserer eigenen Galaxis nur schwer untersuchen. Unklarheit über die Entfernungen, Extinktion durch interstellaren Staub und die Überlagerung der Objekte in der Sichtlinie schränken die Möglichkeiten der Untersuchungen der nächstgelegenen Sternentstehungsregionen ein.

Andererseits können für Untersuchungen der Entwicklung von Galaxien jetzt umfangreiche statistische Daten genutzt werden. Hunderttausende Galaxien können zur Messung der Demografie der Galaxienpopulation mit hoher Präzision herangezogen werden. Gleichzeitig hat die Kombination aus leistungsfähigen numerischen Simulationen und Beobachtungen ein fundiertes Verständnis der Entstehung und Entwicklung großer Strukturen ermöglicht. Mit Hilfe der leistungsfähigsten Radio- und optischen Teleskope können Astronomen jetzt riesige Gasvorkommen und heftige Sternbildung weniger als eine Milliarde Jahre nach dem Urknall entdecken. Hierdurch verfügen wir jetzt über genaue Kenntnisse der Herkunft und Entwicklung von Galaxienpopulationen auf kosmologischer Skala.

Galaxiendurchmusterungen und Beobachtungen bei hohen Rotverschiebungen ermöglichen jedoch üblicherweise keine Auflösung einzelner sternbildender Molekülwolken. Auch fallen diese Prozesse durch das Raster der meisten numerischen Simulationen. Zudem ist die für die Charakterisierung des ISM erforderliche Kombination aus detaillierten Infrarot- und Radiomessungen auch für nahe Galaxien schwer zu erzielen. Auf große Entfernungen ist die räumliche Auflösung der Verteilung von Staub und Gas auf der für die Sternbildung relevanten Skala mit der aktuellen Technologie einfach nicht möglich. Aus diesem Grund werden die Prozesse der Wolken- und Sternbildung und des stellaren Feedbacks außerhalb der Lokalen Gruppe üblicherweise nicht direkt beobachtet.

Untersuchungen naher Galaxien füllen die Lücke zwischen diesen beiden Feldern (und verknüpfen damit die Forschungen beider Abteilungen des MPIA auf vielfältige Weise). Unser Blick auf diese Systeme und insbesondere auf die Galaxien, die wir 'von oben' betrachten, ist weitestgehend frei von Unsicherheiten bezüglich der Entfernungen und der interstellaren Extinktion, die die Beobachtung galaktischer Objekte beeinträchtigen. So ist es möglich, ein Bild der Massenbilanz, des Lebenszyklus der Sterne oder der verschiedenen Phasen des Interstellaren Mediums zu erstellen, aus dem mit ei-

niger Sicherheit hervorgeht, dass beispielsweise Sterne und Gaswolken, die wir auf der gleichen Sichtlinie beobachten, möglicherweise miteinander assoziiert sind. Dies macht diese Systeme zu einem natürlichen Ort für die detaillierte Untersuchung der Prozesse, die auf galaktischen Skalen ablaufen – wie etwa die Entstehung sternbildender Molekülwolken, die Wechselwirkung zwischen Spiralstruktur und Sternbildung, die Auswirkungen des Sterntods auf das umgebende Gas, die lokale Verteilung Dunkler Materie oder die »Fütterung« der supermassereichen Schwarzen Löcher, die in den Zentrum vieler Galaxien angetroffen werden.

Darüber hinaus sind viele Phänomene, die in der Milchstraße nicht ohne weiteres zugänglich sind, in benachbarten Galaxien gut zu beobachten. In den Gebieten leuchtkräftiger Sternentstehungsausbrüche herrschen Bedingungen, die auf Kiloparsec-Skalen mit galaktischen Sternentstehungsgebieten vergleichbar sind und Super-Sternhaufen bilden, die wahrscheinlich jüngere Abbilder der Kugelsternhaufen sind, die in der Milchstraße lediglich als Fossilien vorgefunden werden. Zwerggalaxien enthalten ausgedehnte Gebiete interstellarer Materie, die weitestgehend nicht durch vorherige Sternengenerationen mit schweren Elementen angereichert sind. Zwerg- und Starburts-Galaxien können gleichermaßen einen Ausblick in eine ferne Vergangenheit bieten: Verschmelzungen und extrem hohe Sternentstehungsraten werden häufig bei hoher Rotverschiebung beobachtet, während der augenscheinlich »primitive« Zustand der Zwerggalaxien vermutlich demonstriert, wie die Entstehung der ersten Sterne im jungen Universum vonstatten ging. Noch allgemeiner: Die Untersuchung dieser Art von Umgebungen ermöglicht grundsätzlich das Eingrenzen der Auswirkungen der Staub- und Gasdichte, des Strahlungsfelds, der Balken- oder der Spiralstruktur auf die Sternentstehung und des Feedbacks der Sterne an das interstellare Medium. Unser lokales Universum ist ein riesiges Labor, in dem wir testen können, »wie Prozess X von Parameter Y abhängt«, indem wir den »Prozess X« in verschiedenen nahegelegenen Galaxien beobachten.

Die Analogie zu weiter entfernten Systemen zeigt schließlich, dass in unserem Verständnis der Galaxienpopulationen und in der Interpretation von Beobachtungen bei hohen Rotverschiebungen nahe Galaxien eine wichtige Rolle als »Kalibratoren« spielen. Um die Entstehung und Entwicklung von Galaxien zu simulieren, benötigen wir insbesondere quantitative Kenntnisse darüber, wie das interstellare Gas sich in verschiedenen Umgebungen in Sterne umwandelt und welchen Einfluss das stellare Feedback auf das interstellare Medium hat. In Ermangelung einer analytischen Theorie der Sternentstehung auf galaktischer Ebene besteht die übliche Vorgehensweise darin, diese Relationen empirisch zu kalibrieren und die Modelle und Simulationen dann entsprechend anzupassen. Diese Kalibrierungen finden notwendigerweise in nahegelegenen

Galaxien statt, wo alle erforderlichen Daten (insbesondere Messungen des ISM) gesammelt werden können. Dieselben quantitativen Beziehungen werden oftmals zur Interpretation weit entfernter Systeme, einschließlich Galaxiendurchmusterungen, Beobachtungen bei hohen Rotverschiebungen und Studien des Lyman-Alpha-Waldes genutzt.

Untersuchungen bei vielen Wellenlängen

Trotz der relativ geringen Entfernung bedeutet die Zusammenstellung eines kompletten Bildes der Materieverteilung in nahen Galaxien immer noch eine Herausforderung für die Beobachter. Umfassende hochauflösende Karten des ISM erfordern einen hohen Einsatz an Teleskopzeit, und eine akkurate Bestandsaufnahme der jüngsten Sternentstehung erfordert idealerweise Infrarot- und Ultraviolett-Beobachtungen, d.h. bei Wellenlängen, die von der Erde aus größtenteils nicht zugänglich sind. Aus diesem Grund haben sich die meisten Studien entweder auf die Beobachtung einer einheitlichen Stichprobe bei einer oder zwei Wellenlängen oder auf ausführliche Fallstudien bei vielen Wellenlängen konzentriert. Dank einer Reihe von Studien mit Weltraum- und Radioteleskopen stehen einheitliche, hochauflösende und hochempfindliche Multiwellenlängendaten für Dutzende naher Galaxien zur Verfügung. Jetzt ist es möglich, diese umfassende Stichprobe mit Hilfe hochwertiger Daten aus Radio- und UV-Wellenlängen zu studieren.

Im Rahmen des von R. Kennicutt von der Universität Cambridge geleiteten SPITZER Infrared Nearby Galaxy Survey (SINGS), an dem auch einige derzeitige und frühere Forscher des MPIA beteiligt waren, wurden mit Hilfe des Weltraumteleskops SPITZER im nahen und fernen Infrarot 75 nahe Galaxien kartiert und umfangreiche sekundäre Daten gesammelt. Die mit SINGS gesammelten Bilder und Spektren erfassten das Licht alter Sterne, die thermische Emission kleiner Staubteilchen in Sternentstehungsgebieten und größerer Staubkörner des interstellaren Mediums.

Gleichzeitig führte der Satellit Galaxy Evolution Explorer (GALEX) eine Durchmusterung durch, in deren Rahmen von mehr als tausend nahen Galaxien neben anderen Daten tiefe Bilder im fernen und nahen ultravioletten Licht erstellt wurden. Die Bilder führten unter anderem zu der überraschenden Entdeckung, dass sich die Sternentstehung auf niedrigem Niveau weit in die Außenbereiche vieler Galaxien erstreckt.

Die durch THINGS, SINGS und GALEX NGS ermöglichte Sicht auf vier nahegelegene Spiralgalaxien zeigt Abb. II.8.2 auf Seite 59. Solche Karten des interstellaren Gases sind der Schlüssel zur Untersuchung der galaktischen Kinematik, der Sternentstehung oder des stellaren Feedbacks; das MPIA spielt eine wesentliche Rolle auf diesem Gebiet. Hier sollen zwei Programme des

MPIA vorgestellt werden: der HI Nearby Galaxy Survey und ein in der Entwicklung befindliches ergänzendes Programm zur erweiterten und genaueren Kartierung der molekularen Linienemission der selben Stichprobe.

Die THINGS-Durchmusterung

Die THINGS-Durchmusterung (The HI Nearby Galaxy Survey) des MPIA nutzte das Very Large Array, um die Verteilung des atomaren Wasserstoffs in 34 nahen Galaxien zu kartieren. Die 2003 begonnene THINGS-Studie, deren Datenerfassung und -auswertung 2006 abgeschlossen wurde, ist eines der größten jemals vom Very Large Array in Angriff genommenen Programme.

THINGS kartierte die Emission des atomaren Wasserstoffs (HI) bei 21 cm Wellenlänge und erzielte präzise, hochauflösende Messungen der Massenverteilung des HI in jeder einzelnen Galaxie. Mit einer Winkelauflösung von 7 Bogensekunden (typischerweise 200 bis 300 Parsec) sind die Daten hervorragend für den Vergleich mit den Bildern von GALEX im UV und vom Weltraumteleskop SPITZER im mittleren und fernen Infrarot geeignet. Da in der THINGS- wie in der SINGS-Durchmusterung dieselben Galaxien untersucht wurden, ist diese Art von Vergleich die Hauptstütze der daraus resultierenden Forschung, die sich auf die Kombination von Daten aus zahlreichen verschiedenen Wellenlängen konzentriert, um ein vollständigeres Bild der Sterne, des Gases und des Staubs zu erhalten, als es bisher möglich war.

Die 21-cm-Linie enthält außerdem Geschwindigkeitsinformationen, und wo immer THINGS atomares Gas entdeckt hat, wurde auch dessen Radialgeschwindigkeit mit einer Genauigkeit von 5 km/s gemessen. THINGS erzielte daher – zusätzlich zu der Kartierung der Gasverteilung – auch Abbildungen der Geschwindigkeitsfelder des Gases. Dies ermöglicht eine Reihe von speziellen Studien – von der Suche nach Löchern und Schalen in der atomaren Gasverteilung bis zu detaillierten Untersuchungen der Verteilung Dunkler Materie über deren Gravitationswirkung.

All diese Daten dienen jetzt als Grundlage für mehr als ein halbes Dutzend Dissertationen und die erste Forschungsphase umfasst mehr als ein Dutzend wissenschaftlicher Veröffentlichungen, die bereits eingereicht wurden oder kurz davor stehen. In den nachfolgenden Abschnitten werden einige der Fragen beschrieben, mit denen sich das THINGS-Team beschäftigt hat:

- Wie verteilt sich die Dunkle Materie in jeder Galaxie? Aufgrund der von THINGS gemessenen Gasbewegungen kann man die Verteilung der Masse in jeder Galaxie und nach dem Vergleich mit dem Sternenlicht und der Gasverteilung die Verteilung der Dunklen Materie ableiten.
- Wo enden Galaxien? THINGS-Karten sind sehr empfindlich und sehr groß und ermöglichen die vollständige

Kartierung des interstellaren Gases einer Galaxie. Dies lässt Rückschlüsse auf den Ursprung der galaktischen Strukturen und die Bedingungen in dem Raum zwischen den Galaxien, und insbesondere in Bezug auf das Strahlungsfeld zu.

- Wie verteilen sich die Löcher und Schalen in dem ISM? Schon eine oberflächliche Betrachtung der THINGS-Karten zeigt eine Vielzahl solcher Strukturen und deren systematische Bestimmung ihrer Eigenschaften kann – beispielsweise durch den Vergleich mit der Verteilung in jungen Sternhaufen – Hinweise auf deren Ursprung geben.
- Kommen die tiefsten Wasserstoffabsorptionslinien, die auf der Sichtlinie zu den Quasaren mit hoher Rotverschiebung entstehen, auch aus Galaxien wie die in unserer Umgebung? Durch die Simulation des Effekts mittels durch die THINGS-Galaxien gezogener zufälliger Sichtlinien besteht vielleicht die Möglichkeit, die Verteilung dieser so genannten »gedämpften Lyman-Alpha-Systeme« erklären zu können.

Zusätzlich zu den vier später in diesem Kapitel im Detail beschriebenen, am MPIA durchgeführten Projekten stehen ein halbes Dutzend weiterer Projekte kurz vor dem Abschluss. Doch selbst nach dieser umfassenden ersten wissenschaftlichen Runde ist das Potenzial von THINGS bei Weitem noch nicht ausgeschöpft. Die zweite Projekttrunde steht kurz bevor. Ergänzende Molekülliniendaten werden gesammelt und die Stichprobe wird als Teil des Legacy Program des Weltraumteleskops HERSCHEL untersucht werden.

Ein neuer Atlas des molekularen Gases unter Verwendung des 30-m-Teleskops IRAM

Der von THINGS untersuchte atomare Wasserstoff ist eine Hauptkomponente des ISM, stellt jedoch nicht das gesamte Gas dar. Insbesondere im Zentrum von Spiralgalaxien ist nicht atomares, sondern vielmehr molekulares Gas der Hauptbestandteil des ISM. Dies ist auch die Phase, die Beobachtungen zufolge am direktesten mit der Sternbildung verbunden ist. Aus diesem Grund muss jede Studie, deren Ziel darin besteht, zu verstehen, warum sich Sterne bilden, das molekulare Gas berücksichtigen.

Unglücklicherweise hat das H_2 , aus dem die molekulare Phase hauptsächlich besteht, kein Dipolmoment, sodass es unter den Bedingungen, unter denen es in dem ISM vorliegt (kalte, dunkle Wolken), nicht ohne weiteres zu beobachten ist. Aus diesem Grund wird oftmals die Emission anderer Moleküle genutzt, um die Verteilung und Menge des molekularen Gases abzuleiten. CO ist das am häufigsten verwendete Indikatormolekül. Obwohl CO in relativ großen Mengen vorhanden und hell ist, ist seine Kartierung immer noch eine herausfordernde Aufgabe und das Fehlen umfassender und präziser Karten der

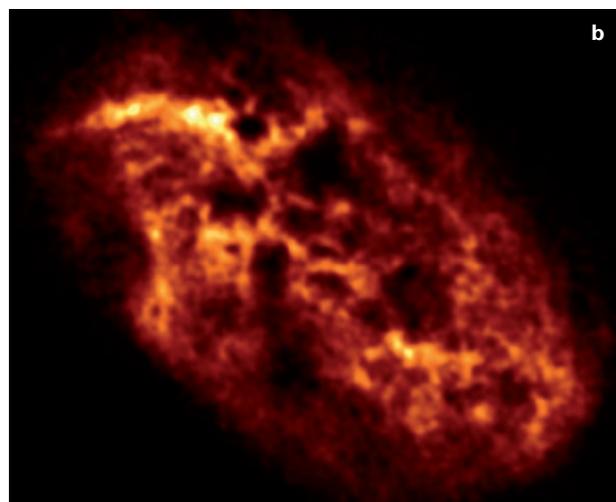


Abb. III.1.1: *a)* Die LBT-Ansicht der unregelmäßigen Zwerggalaxie IC 2574. Dieses dreifarbiges Bild zeigt das ultraviolette Licht in Blau, das blaue Licht in Grün und das visuelle Licht in Rot. Die ausgedehnte unregelmäßige Verteilung der Sternbildung ist offensichtlich. *b)* Die Verteilung des atomaren

Wasserstoffs in IC 2574, gemessen mit dem VLA als Teil der THINGS-Studie. Hier sind viele Löcher und Schalen zu erkennen. Dennoch würde man aufgrund des Energieausstoßes der jungen Sterne auf der Grundlage der LBT-Daten eine größere Anzahl dieser Strukturen erwarten.

CO-Emission ist ein ernstes Problem (obwohl der bahnbrechende BIMA Survey of Nearby Galaxies wichtige Fortschritte in dieser Richtung erzielt hat).

Nach einem Pilotprojekt im Winter 2006 startete das MPIA-Führungsteam 2007 ein umfangreiches Projekt unter Verwendung des 30-m-Teleskops IRAM, um das molekulare Gas in einem Teilbereich der THINGS/SINGS-Stichprobe zu untersuchen. Dieses Projekt nutzt mehr als 300 Stunden Teleskopzeit, um die CO-Linienemission von 20 THINGS-Galaxien zu kartieren. Dabei wird das Detektor-Array HERA verwendet, das aus neun Empfängern besteht. HERA erlaubt eine schnelle und einfache Kartierung der CO (2 → 1)-Emission und ermöglicht so eine präzise Bestandsaufnahme über weite Bereiche bei einer hervorragenden Winkelauflösung von 11 Bogensekunden. Da das Array die Emission gleich-



zeitig aus 9 Himmelspositionen abbildet, bietet HERA eine Effizienzsteigerung von fast einer Größenordnung, die es ermöglicht, ein Projekt, das vor nur fünf Jahren noch knapp 3000 Stunden in Anspruch genommen hätte, in nur 300 Stunden abzuschließen.

Obwohl die HERA-Studie erst im Frühjahr 2008 abgeschlossen sein wird, liegen bereits jetzt aufregende Ergebnisse vor. Insbesondere wird bereits eine auffällige, nahezu vollständige Entsprechung zwischen der CO-Linienemission und der aus den UV- und Infrarot-Bildern abgeleiteten Rate der Sternbildung erkannt. Das Ergebnis lässt vermuten, dass sich molekulares Gas in allen von dem Team untersuchten Spiralgalaxien etwa auf dieselbe Weise bildet.

Wissenschaftliche Höhepunkte

Erste wissenschaftliche Arbeiten mit dem LBT:
Stellares Feedback in IC 2574

Das Large Binocular Telescope (LBT) ist mit seiner großen Öffnung, dem großen Gesichtsfeld und der hervorragenden Empfindlichkeit im blauen Spektralbereich ein leistungsfähiges Instrument zur Untersuchung der Sternbildung in nahen Galaxien. Einige der ersten mit dem LBT erzielten Forschungsergebnisse zeugen bereits von dieser Leistungsfähigkeit. Forscher des MPIA leiten ein Projekt zur präzisen Kartierung der U -, B - und V -Helligkeitsverteilung der nahen irregulären Zwerggalaxie IC2574 am LBT – ein Ziel, das auch THINGS verfolgt. Mit ausgedehnten Sternentstehungsgebieten und einer durch Dutzende bekannter Löcher und Schalen gekennzeichneten HI-Verteilung ist IC2574 ein ideales Gebiet zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen der mit dem LBT beobachteten Sternbildung und dem im Rahmen von THINGS untersuchten ISM.

Anhand der LBT-Daten (Abb. III.1.1a) konnten die Forscher die Anzahl junger Sterne an jedem Ort der Galaxie und den Zeitpunkt ihrer Entstehung abschätzen. Darüber hinaus konnte das Team berechnen, wie viel Energie in Form von Winden, Supernova-Explosionen und ionisierenden Photonen diese Sterne freisetzen. Der Vergleich dieser Informationen mit der atomaren Wasserstoffkarte von IC2574 (Abb. III.1.1b) zeigte, dass diese Sterne genügend viel Energie liefern, um die beobachtete Menge an Löchern und Hüllen zu schaffen (Abb. III.1.2). Diese Sterne können in der Tat problemlos für alle in dem Gas beobachteten Bewegungen verantwortlich sein. Die überraschende Beobachtung ist – wenn überhaupt –, dass es nur so wenige Löcher gibt.

Die Forscher schätzten auf der Grundlage der vergleichsweise geringen Energiemengen in den Löchern und dem Gas, welcher Anteil des stellaren Feedbacks und der ionisierenden Photonen sich in dem atomaren Gas ablagert, und ermittelten für beide Anteile Werte zwischen 10 und 20 Prozent. Des Weiteren stellte sie der Versuch,

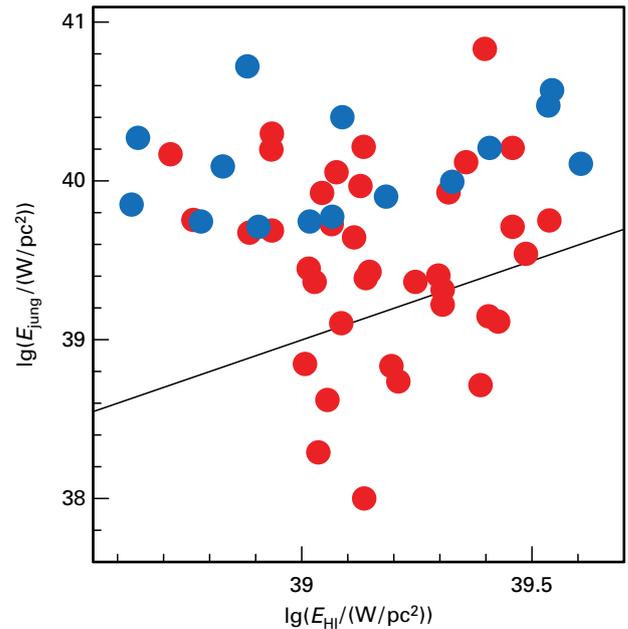


Abb. III.1.2: Der aus den in Abb. III.1.1a gezeigten LBT-Daten abgeleitete Energieausstoß junger Sterne als Funktion der in dem atomaren Wasserstoffgas festgestellten Energie. Die durchgehende Linie zeigt die Gleichheit. Die blauen Punkte zeigen Orte, an denen Löcher im HI festgestellt wurden, und die roten Punkte stellen Orte ohne Löcher dar. Auch dort, wo keine Löcher sind, liegen die Punkte üblicherweise weit über der Linie. Dies bedeutet, dass der Energieausstoß der jungen Sterne mehr als ausreichend ist, um die gesamte Energie in dem atomaren Gas zu liefern.

herauszufinden, welche jungen Sternpopulationen für die meisten der beobachteten Löcher verantwortlich waren, vor Probleme. Diese Ergebnisse unterstützten den aufkommenden Verdacht, dass die Verbindung zwischen dem stellaren Feedback und dem atomaren Gas in der Tat recht schwach sein könnte. Diese quantitative Einschränkung für die Aufteilung der von den Sternen ausgestoßene Energie auf verschiedene Kanäle ist besonders wichtig, da das Feedback weiterhin ein häufig angeführter, aber immer noch wenig eingegrenzter Aspekt des Lebenszyklus der Sterne und des ISM ist. Der Erfolg des Projekts unterstreicht auch die vielversprechenden Möglichkeiten, die das LBT als Instrument zur Untersuchung der Entwicklung naher Galaxien bietet.

Nutzung von THINGS und SINGS zur Bestimmung der Zeitskala der Sternbildung

Einer der am wenigsten eingegrenzten Aspekte der Sternbildung ist gleichzeitig einer der einfachsten: Wie lange besteht eine sternbildende Molekülwolke? Entsprechende Beobachtungen lassen eine Lebenszeit im Bereich zwischen der Kollapszeit (einige Millionen Jahre) und dreißig bis vierzig Millionen Jahre vermuten. Und es gibt Hinweise, dass Wolken sogar noch länger bestehen.

MPIA-Wissenschaftler kombinierten die Daten aus THINGS und SINGS, um neuartige Messungen der Zeitskala für Sternbildung in nahen Galaxien vorzunehmen. Die Wissenschaftler untersuchten dazu relativ massereiche Galaxien mit gut ausgebildeten Strukturen innerhalb und außerhalb der Spiralarme in atomaren Wasserstoff-Karten (erstellt durch THINGS) und Karten im mittleren Infrarot aus SINGS. Die atomare Wasserstoff-Emission stellt das Material dar, aus dem sich Sterne bilden, während die Emission im mittleren Infrarot oftmals ein Indikator für eingebettete Sternbildung ist und daher vermuten lässt, dass die Sternbildung bereits stattgefunden hat. Aus diesem Grund stellen die bei diesen beiden Wellenlängen beobachteten Spiralmuster zwei sequentielle Phasen dar: den Beginn des Wolkenkollaps und die Bildung massereicher Sternhaufen. Die Forscher folgerten daraus, dass, wenn sie die Winkelverschiebung zwischen diesen beiden Vertretern verschiedener Epochen und die Geschwindigkeit, mit der das Spiralmuster rotiert, messen könnten, sich auf dieser Grundlage eine charakteristische Zeitskala für die Sternbildung in Spiralgalaxien abschätzen ließe.

Durch die Kreuz-Korrelation zwischen HI- und Infrarot-Daten in einer Reihe von konzentrischen Ringen konnten die MPIA-Forscher die Verschiebung zwischen dem Spiralmuster im Infraroten und im atomaren Gas messen, auch wenn diese Messung unterhalb der Auflösung beider Datensätze lag. Da angenommen wird, dass die spiralförmigen Dichtwellen sich mit einer festen Winkelgeschwindigkeit bewegen, ist die Verschiebung zwischen diesen beiden Mustern eine gut

definierte Funktion des Radius (die gleiche Winkelgeschwindigkeit entspricht bei größeren Radien höheren räumlichen Geschwindigkeiten und resultiert daher in größeren Verschiebungen bei größeren Radien) und die Wissenschaftler passen diese Funktion an, um die Winkelgeschwindigkeit der Spiralwellen abzuleiten.

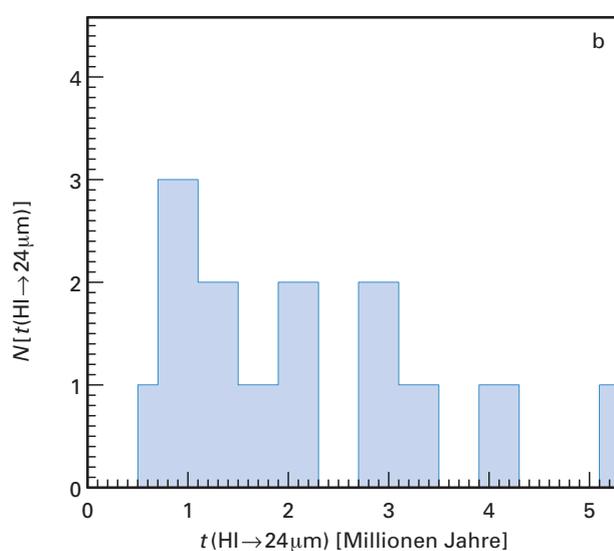
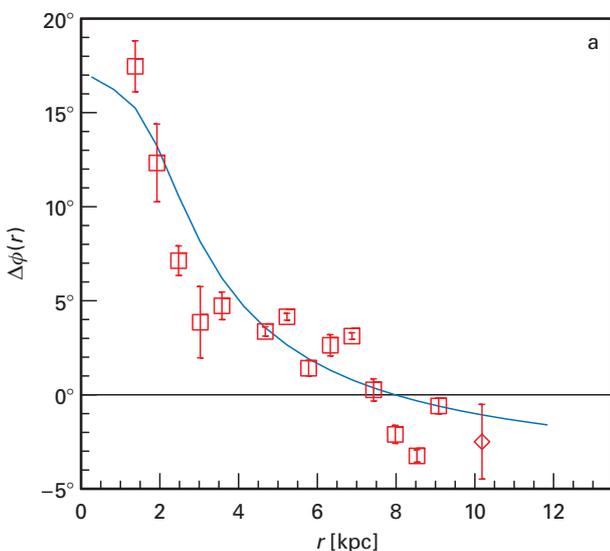
Die Ergebnisse (siehe z.B. Abb. III.1.3) implizieren, dass der Versatz zwischen dem Maximum der HI-Verteilung und dem Maximum der eingebetteten Sternbildung im Durchschnitt einer Zeitverzögerung von nur einigen Millionen Jahre beträgt. Dieser Wert entspricht dem für die Lebensdauer kurzlebiger Molekülwolken angenommenen Wert und steht im Widerspruch zu den Ergebnissen vieler häufig verwendeter Methoden. Auch zeigen diese Ergebnisse erneut, welche weitreichenden Erkenntnisse durch die neue Generation der Multiwellenlängen-Studien gewonnen werden können.

Die Beziehung zwischen Gas und Sternbildung

Die Messung der quantitativen Beziehung zwischen Gas und Sternbildung in nahen Galaxien ist ein grundlegendes Ziel der THINGS-, SINGS- und der neuen IRAM-Studie. Der häufigste Beobachtungsansatz in Bezug auf dieses Thema besteht darin, die Menge der atomaren und molekularen Gase pro Flächeneinheit in Beziehung zu der durchschnittlichen Sternbildungsrate pro Flächeneinheit zu setzen. Dieses beobachtete Verhältnis wird als Bezugswert für Modellrechnungen von Galaxien verwendet und dient zur Interpretation von Beobachtungen bei hoher Rotverschiebung; es stellt eine der

Abb. III.1.3: a) Der zwischen den Infrarot- und den HI-Armen gemessene Winkelversatz in der Spiralgalaxie NGC 3627 als Funktion des Radius. Die durchgezogene Linie entspricht einer festen Zeitverzögerung zwischen den beiden Armen. b) Die Verteilung der Verzögerung zwischen HI- und Infrarot-Armen

für alle untersuchten Spiralgalaxien. Der typische Wert beträgt einige Millionen Jahre und bedeutet, dass, sobald das Material für die Sternbildung (das atomare Gas) zur Verfügung steht, die Sternbildung (angezeigt durch die Infrarotstrahlung) recht schnell eintritt.



Haupteigenschaften dar, die von jeder Theorie über großräumige Sternbildung erklärt werden müssen.

Frühere Studien, in deren Rahmen Gas mit der Sternbildung verglichen wurde, zeigten eine erstaunliche Korrelation zwischen der Gasdichte und der Sternbildung pro Flächeneinheit im großen Maßstab. Diese Studien haben entweder Durchschnittswerte aus gesamten Galaxienscheiben gebildet oder sehr große Bereiche berücksichtigt und Durchschnittswerte aus Daten gebildet, um ein Radialprofil der Galaxie erstellen. Ein zentrales Ziel der SINGS- und THINGS-Studien bestand daher darin, diese Messung auf kleinere Skalen auszudehnen, die eher der Skala entsprachen, auf der sich Molekülwolken bilden, aus denen Sterne hervorgehen.

MPIA-Wissenschaftler kombinierten Daten aus der GALEX-Durchmusterung, THINGS, SINGS und der IRAM-Studie, um eine der ersten einheitlichen Messungen dieser Beziehung unterhalb der Kiloparsec-Skala durchzuführen. Sie schätzten die Rate der jüngsten Sternbildung durch die Kombination von UV- und Infrarotlicht, um so direkt sichtbare wie auch durch Staub verdeckte Sterne zu zählen.

Die Wissenschaftler fanden heraus, dass die Menge an molekularem Gas in einem vorgegebenen Teil der Galaxie alleine ein sehr guter Indikator für Sternbildung ist (Abb. II.8.8): Die Plots zeigen, wie die Sternbildungsrate entlang einer Sichtlinie durch eine Galaxie (y -Achse) von der Menge des atomaren Gases (x -Achse im linken oberen Plot) und des molekularen Gases (x -Achse im rechten oberen Plot) entlang derselben Sichtlinie abhängt. Die Sternbildung wird aus FUV-Daten der GALEX NGS-Studie und 24- μm -Daten aus der SINGS-Studie abgeleitet. Das atomare Gas wird anhand der THINGS-Karten bestimmt, während das molekulare Gas auf der Grundlage der IRAM 30 m CO-Karten geschätzt wird. Das rechte Bild zeigt, dass H_2 und die Sternbildung nahezu einer 1-zu-1-Relation unterliegen, während das linke Bild die HI-Menge entlang der Sichtlinie zeigt, von der die Sternbildungsrate nur wenig abhängt.

Darüber hinaus fanden sie nur wenige Abweichungen in der Anzahl der Sterne, die sich aus jedem Teilabschnitt des molekularen Gases bilden. Obwohl bekannt ist, dass molekulares Gas unter extremem Druck – wie er in den Starburst-Galaxien vorliegt – Sterne sehr effizient bildet, waren die hier untersuchten Galaxien in den meisten Fällen normale Spiralgalaxien, die Sterne nur mit moderater Geschwindigkeit bilden. Die Forscher hatten daher angenommen, dass die offensichtliche Einheitlichkeit der Anzahl der gebildeten Sterne pro Einheit des molekularen Gases darauf hinweist, dass in Spiralgalaxien die Sternbildung in Molekülwolken stattfindet, die weitestgehend überall gleich aussehen und sich möglicherweise nicht sehr von den in unserer eigenen Milchstraße vorkommenden Wolken unterscheiden.

Das Team zog bei der Betrachtung des atomaren Gases völlig andere Schlussfolgerungen. Das Verhältnis

zwischen dem atomaren und dem molekularen Gas sowie die Sternbildungsrate pro Flächeneinheit des atomaren Gases variieren erheblich innerhalb und zwischen verschiedenen Galaxien. Je nach Standort kann dieselbe Menge atomaren Gases entweder starke oder fast keine Sternbildungen beinhalten. Das Team folgerte aus diesen Ergebnissen, dass, obwohl die Entstehung von Sternen aus Molekülwolken ein relativ einheitlicher Prozess ist, die Bildung dieser Wolken stark von den Umgebungsbedingungen der Galaxie abhängt. Sie betonten, dass die Rolle alter Sterne in diesem Prozess darin besteht, das Gas durch ihre Gravitationswirkung zu komprimieren, sodass das Gas in der Nähe tiefer durch die Sterne verursachter Potenzialsenken dichter ist als in den Randbereichen der Galaxien.

Staub und Gas in der extremen Umgebung von Zwerggalaxien

Wir haben bereits am Rande erwähnt, dass nahe Galaxien eine Vielzahl verschiedener Umgebungen beinhalten, die die Entstehung von Sternen und der Wolken, aus denen diese hervorgehen, unterstützen oder beeinträchtigen können. Wir haben auch das häufig angeführte Argument erwähnt, dass insbesondere Zwerggalaxien Bedingungen aufweisen, die den Zuständen im frühen Universum entsprechen: geringe Vorkommen schwerer Elemente, intensive Strahlungsfelder, große Mengen atomarer Gase, aber relativ wenig Staub. Der letzte Punkt ist besonders wichtig für die Sternbildung, da der Staub hilft, Molekülwolken abzuschirmen und als Ort der meisten molekularen Wasserstoffbildung dient. Diese Behauptungen wurden oft aufgestellt, doch die Messung der physikalischen Bedingungen in nahen Zwerggalaxien ist ebenso schwierig wie für das Verständnis der Sternbildung in extremen Umgebungen wichtig.

MPIA-Forscher kombinierten die THINGS- und SINGS-Studien genau zu diesem Zweck. Sie nutzten die Infrarot-Emission, um die Eigenschaften des Staubs in den unregelmäßigen Zwerggalaxien der nahegelegenen M 81-Gruppe zu messen. Sie fanden heraus, dass die Staubmenge noch geringer war als die reichhaltigen Mengen an schweren Elementen vermuten ließen, und entdeckten Anzeichen dafür, dass intensive Strahlungsfelder den Staub auf höhere Temperaturen erhitzen als üblicherweise in Spiralgalaxien gemessen. Das Team stellte außerdem fest, dass die thermische Emission kleiner Staubkörner über das Kontinuum im mittleren Infrarot und die PAH-Emissionseigenschaften auch zwischen Zwerggalaxien mit ansonsten vergleichbaren Eigenschaften erheblich variieren. Obwohl diese kleinen Körner hinsichtlich ihrer Masse nur einen kleinen Bestandteil der Galaxien darstellen, sind sie für einen großen Teil der lichtabsorbierenden Oberfläche der Staubteilchen verantwortlich und ihre Anwesenheit oder Abwesenheit kann die Wärmebilanz des ISM daher erheblich beeinflussen.

Die Fütterung aktiver galaktischer Kerne in nahen Galaxien

Die Sternbildung ist nicht der einzige wichtige Prozess, der durch Gas versorgt wird. Gas treibt auch aktive galaktische Kerne an, versorgt die riesigen Schwarzen Löcher in den Zentren von Galaxien und erzeugt dabei einige der hellsten und energetischsten Phänomene des Universums. Quasare, entfernte, hellere Verwandte der lokalen AGN (Seyferts und LINERS) werden bei extrem hoher Rotverschiebung sichtbar. Doch die dynamischen Prozesse lassen sich nur in den nächstgelegenen Galaxien, in denen AGN (aktive Galaxienkerne) angetroffen werden, räumlich auflösen. Bis heute fehlt ein allgemeines Bild für diese Versorgungsprozesse: Welche Mechanismen sind für die verschiedenen, lokal beobachteten Arten von AGN verantwortlich? Wie lässt sich der Drehimpuls der weit vom gravitativen Einfluss des zentralen Schwarzen Lochs entfernten Materie abführen?

Forscher des MPIA betrieben auch in diesem Bereich aktive Studien. Als Teil der Kooperation »Nuclei of Galaxies« (NUGA) nutzten MPIA-Forscher das VLA, um Verteilung und Kinematik des atomaren Gases in 16 nahen Spiralgalaxien zu kartieren. Die Karten ergänzen die bestehenden molekularen Gasdaten, die durch die NUGA-Kooperation unter Verwendung des IRAM-Interferometers auf Plateau de Bure gewonnen wurden. Die Forscher fanden eine Verbindung zwischen der Verteilung des atomaren Gases und der Kernaktivität und konzentrieren sich jetzt auf die Gaszufuhr in den Zentren der untersuchten Galaxien.

Um den Gasfluss in verschiedenen räumlichen Maßstäben von wenigen 10 Parsec in der genauen Mitte der äußeren Scheibe bis zu einem Abstand von mehreren Kiloparsec zu verfolgen, berechneten die Forscher Gravitationsmoment-Karten auf der Grundlage der stellaren Helligkeitsverteilung sowie der Verteilung und Kinematik von atomarem und molekularem Gas. Da Gravitationsmomente als Rate des Drehimpuls-Austausches definiert sind, können diese genutzt werden, um die Gaszufuhr als Funktion des Radialabstands vom Zentrum vorherzusagen. Diese neue Methode ermöglicht es den Forschern, die Zeitskala und Effizienz der Versorgung galaktischer Kerne zu analysieren, und bietet wahrscheinlich neue Einsichten in das Wachstum Schwarzer Löcher und Bulges.

Zukunftsansichten

THINGS wird auch in der unmittelbaren Zukunft als Grundlage für zahlreiche Forschungsprojekte dienen. Derzeit werden bereits Versuche unternommen, die zufälligen Bewegungen des atomaren Gases und die Sternbildung in den Randgebieten von Spiralgalaxien zu studieren. Mit dem Abschluss der IRAM CO-Studie im Frühjahr 2008 wird der Start zahlreicher neuer Projekte zur Untersuchung der Sternbildung und der Entwicklung des molekularen Gases einhergehen. Mit zunehmender Leistungsfähigkeit wird das LBT eine immer wichtigere Rolle spielen. Beobachtungen, die der Erweiterung der Untersuchungen in IC 2574 auf kleinere und größere Galaxien dienen, werden bereits durchgeführt oder sind geplant.

Über einen etwas längeren Zeitraum werden die meisten Ziele der THINGS- und IRAM-Studie als Teil des KINGFISH-Kernprogramms des HERSCHEL Space Observatory berücksichtigt (PI: R. Kennicutt, Universität Cambridge). Das HERSCHEL-Observatorium, dessen Inbetriebnahme 2008 geplant ist, verspricht neue Einblicke in das ISM zu gewähren. Das Observatorium wird Infrarotstrahlung mit bisher unerreichter Auflösung beobachten, die Submillimeter-Emission, die für eine genaue Bestandsaufnahme des interstellaren Staubs wesentlich ist, kartieren und – vor allem – umfassende Beobachtungen der Kühllinien des ISM ermöglichen. In Kombination mit Karten des interstellaren Gases (einschließlich der THINGS- und IRAM-Studie) bieten diese Beobachtungen die bisher besten Eingrenzungsmöglichkeiten in Bezug auf die Energiebilanz des neutralen ISM sowie neue Einblicke in die physikalischen Prozesse, die bei der Umwandlung von Gas in Sterne ablaufen.

Zu Beginn des nächsten Jahrzehnts soll das Atacama Large Millimeter Array (ALMA) in Betrieb genommen werden. ALMA verspricht, die Millimeter- und Submillimeter-Astronomie und damit unsere Kenntnisse des Staubs und der Moleküle zu revolutionieren. Am Ende des Jahrzehnts soll das Square Kilometer Array vollständig in Betrieb sein und einen ähnlichen Sprung in der Radioastronomie auslösen. Mit diesen Teleskopen wird die Untersuchung von Gas und Staub bei hohen Rotverschiebungen Routine sein und die Beobachtung nahegelegener Galaxien eine Auflösung erzielen, die bisher nur in der Milchstraße möglich ist. Das MPIA hilft durch die hier beschriebenen Projekte, die Arbeit mit diesen neuen Instrumenten und somit den Boden für Studien der Sternbildung und des ISM im nächsten Jahrzehnt vorzubereiten.

*Adam Leroy, Frank Bigiel, Sebastian Haan,
Anna Pasquali, Eva Schinnerer,
Domenico Tamburro, Fabian Walter
und die THINGS-Kollaboration*

III.2 In welchen Galaxien leben Quasare?

Warum gibt es eine feste Beziehung zwischen der Masse des riesigen Bulge einer Galaxie und der viel geringeren Masse ihres nahezu punktförmigen, wenn auch »supermassereichen« zentralen Schwarzen Lochs – als wüsste das Schwarze Loch etwas von der Galaxie, in der es lebt? Warum gibt es eine Zweiteilung der Galaxien in Elliptische und Spiralen, aber recht wenige Galaxien dazwischen?

Diese beiden Fragen könnten eine gemeinsame Antwort haben: Die Energie, die ein supermassereiches Schwarzes Loch während seiner Wachstumsphase in Form von Strahlung abgibt, reicht im Prinzip dazu aus, die Galaxie, in deren Zentrum es sitzt, auseinanderzureißen. Auch wenn dies nicht geschieht, wird möglicherweise durch in Strahlung umgesetzte Akkretionsenergie Gas aus der Galaxie herausgeblasen und dadurch nicht nur weitere Sternentstehung in der Galaxie, sondern auch das weitere Wachstum des zentralen Schwarzen Lochs unterdrückt. Durch eine solche Rückkopplung könnte das Wachstum der zentralen Schwarzen Löcher mit der Sternentstehung in deren Wirtsgalaxien selbstregulierend gekoppelt sein. Eine der spannendsten Phasen im Leben der Galaxien ist somit die, in der ihr zentrales Schwarzes Loch wächst: die Quasarphase. Aber was macht die Galaxien in dieser kurzen Phase so besonders, dass sie dieses Wachstum zulassen? Welche Bedingungen sind für Quasaraktivität Voraussetzung? In was für Galaxien leben also Quasare?

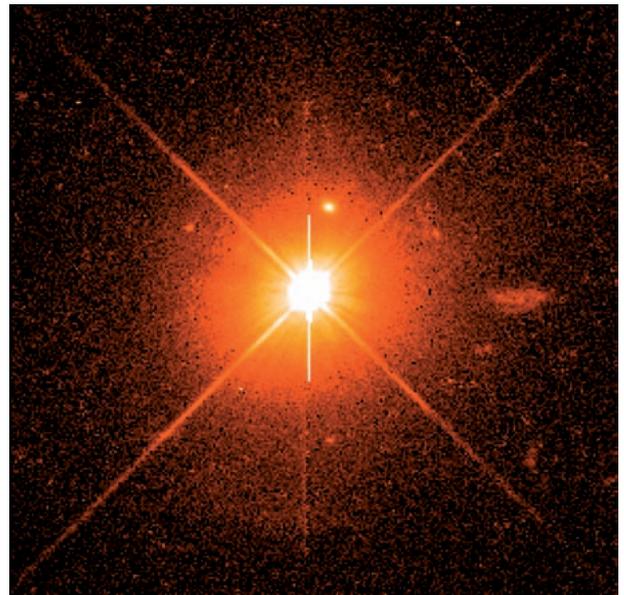
Schwarze Löcher in leuchtenden Galaxien

Die dauerhaft leuchtkräftigsten Quellen im Universum sind Galaxien in einer Phase starken Einfalls von Materie in ihr zentrales supermassereiches Schwarzes Loch. Diese »Quasar« genannte aktive Phase in der Entwicklung von Galaxien – bei den Schwarzen Löchern spricht man auch von aktiven galaktischen Kernen (Active Galactic Nuclei, AGN) – dauert größenordnungsmäßig hundert Millionen Jahre. Während dieser relativ kurzen Zeit werden große Mengen an Gravitationsenergie von in das Schwarze Loch einfallender Materie in Strahlungsenergie umgewandelt (Abb. III.2.1). Um in das Schwarze Loch hineinstürzen zu können, muss die einfallende Materie ihren Drehimpuls abgeben. Auf dem letzten Stück ihres Weges geschieht dies über die Bildung einer dichten sogenannten Akkretionsscheibe um das zentrale Schwarze Loch, deren Durchmesser nur wenige Lichtminuten oder -stunden beträgt, und in der durch Reibung Drehimpuls dissipiert werden kann.

Die während der Quasarphase insgesamt abgestrahlte potentielle Energie der in den tiefen Potentialtopf des Schwarzen Lochs einfallenden Materie übersteigt die gravitative Bindungsenergie aller Sterne in der Galaxie. Sie hätte also, eine entsprechende Kopplung vorausgesetzt, die Möglichkeit, die Galaxie aufzulösen. Wir wissen aber, dass dies nicht geschieht, und es stellt sich die Frage, wie groß der Einfluss der Quasaraktivität auf die umgebende Galaxie tatsächlich ist und welche Bedingungen in der Galaxie vorherrschen müssen, damit ein Quasar entstehen kann.

Seitdem vor gut zehn Jahren die ersten größeren Stichproben von Quasar-Wirtsgalaxien im nahen Universum genauer untersucht wurden, ist klar geworden, dass Aktive Galaxienkerne (AGN), von denen Quasare nur die extreme Ausprägung sind, in allen Galaxien mit einem stellaren »Bulge« (einer zentralen Verdickung) auftreten können. Vermutlich beherbergt jede Galaxie, deren Bulge-Masse mehr als etwa eine Million Sonnenmassen beträgt, ein Schwarzes Loch in ihrem Zentrum, nur unterhalb dieser Grenze herrscht derzeit noch Unsicherheit. Da nun mit wachsender AGN- oder Quasarleuchtkraft und einer als konstant angenommenen relativen Akkretionsrate die Masse des Schwarzen Lochs, und damit auch die Bulge-Masse, wachsen muss,

Abb. III.2.1: Beispiel einer Galaxie in der Quasarphase: HE 1029–1401 ist eine Elliptische Galaxie bei Rotverschiebung $z = 0.086$ mit einer hellen Punktquelle im Zentrum. Für die gesamte Lichtabstrahlung des AGN kann nur die Umwandlung von Gravitationsenergie verantwortlich sein. (Beobachtet mit HST/WFPC2)



erklärt sich, warum die leuchtkräftigsten Quasare nur in massereichen Elliptischen Galaxien vorkommen: Diese Galaxien bestehen einzig aus einem Bulge und erreichen als einzige die benötigten Bulge-Massen. Bei niedrigeren Leuchtkräften wird es dann möglich, dass auch spätere Galaxientypen mit niedrigeren Bulge-Anteilen und damit -massen, also S0- oder Sa-Galaxien oder sogar spätere Spiralen, Quasare oder AGN beherbergen.

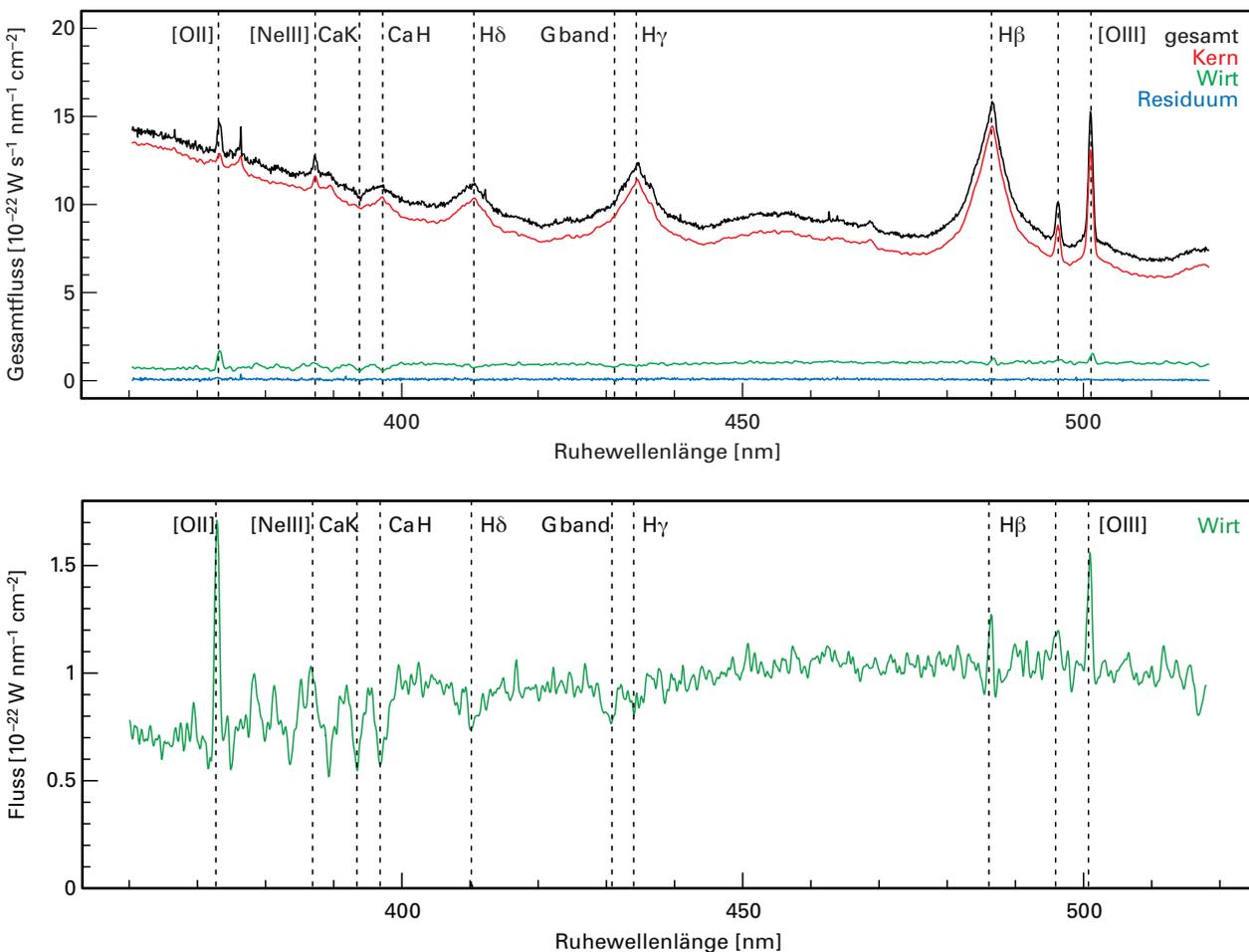
Damit ist jedoch nur die Frage nach der möglichen Elternpopulation von Galaxien geklärt, die supermassereiche Schwarze Löcher beherbergen, nicht aber die Frage nach den für Quasaraktivität notwendigen Umständen. Zur Analyse bieten sich Spektroskopie und Direktaufnahmen von Quasaren im Sichtbaren und im nahen Infraroten an. Dafür steht dem Astronomenteam am MPA, dank der bisher unübertroffenen Schärfe des Weltraumteleskops HUBBLE (HST) und der enormen Lichtstärke des europäischen Very Large Telescope (VLT) zwei mächtige und einzigartige Werkzeuge zur Verfügung.

Spektroskopie mit dem VLT

Bei der Spektroskopie gilt es jedoch eine Schwierigkeit zu überwinden. Die Analyse der Wirtsgalaxie setzt voraus, dass das Licht des Quasarkerns keinen störenden Einfluss ausübt. Bei leuchtkräftigen Quasaren, die erst ab einer Rotverschiebung von $z = 0.1$ bis 0.2 in größeren Zahlen auftreten, entspricht ein Galaxiendurchmesser von zehn Kiloparsec nur ca. drei bis fünf Bogensekunden. Bei einem atmosphärischen Seeing von einer Bogensekunde kann man den Spalt eines Spektrographen zwar so legen, dass der inneren Teil der Galaxie – in dem am ehesten Hinweise zu finden sind, was Quasaraktivität bedingt und inwieweit sie die betroffene Galaxie beeinflusst – erfasst wird, aber man wird gleichzeitig auch einen Großteil des Quasarlichtes, welches die Galaxie zeh- oder sogar hundertfach überstrahlen kann, mit aufnehmen. Es bedarf also einer Methode, diese Lichtanteile nach erfolgter Messung zu trennen.

Abb. III.2.2: Trennung der Spektren des Quasars HE 1503 + 0228 und seiner Wirtsgalaxie. *Oben:* Gesamtspektrum (*schwarz*), der extrahierte Anteil des Quasarkerns (*rot*), die Wirtsgalaxie (*grün*) und das nach Abzug dieser beiden Komponenten verbleibende Residuum. Das Wirtsgalaxiespektrum, *im unteren Diagramm*

vergrößert dargestellt, zeigt alle Merkmale eines normalen Galaxienspektrums, mit Emissions- und Absorptionslinien, die zusammen mit dem Kontinuum auf eine eher junge, eine bis zwei Milliarden Jahre alte Sternpopulation hindeuten. (Jahnke et al. 2007, MNRAS, 378, 23).



Das MPIA-Team hat vor einiger Zeit eine solche Methode entwickelt, mit der unter Ausnutzung der Informationen über die unterschiedliche räumliche Verteilung der Emission von ausgedehnter Galaxie und punktförmigem Quasarkern die Anteile numerisch separiert werden können. Mit diesem Verfahren können nun zumindest für den Fall eines Kontrastes von 10 : 1 die Anteile von Quasar- und Galaxienspektren getrennt und separat analysiert werden. Als Beispiel ist in Abb. III.2.2 unser Ergebnis für den Quasar HE 1503 + 0228 bei der Rotverschiebung $z = 0.135$ gezeigt. Zusammen mit belgischen und schweizer Kollegen, die über eine zweite, technisch unabhängige Methode verfügen, konnte eine größere Stichprobe von nahen ($z < 0.3$) Quasar-Wirtsgalaxien mit am VLT gewonnenen FORS-Spektren in Bezug auf stellare Populationen und ihr interstellares Gas untersucht werden.

Es zeigt sich, dass die energetische Strahlung des Quasars häufig das gesamte Gas einer Wirtsgalaxie zu ionisieren vermag. Mit einem sogenannten BPT-Diagramm kann die für die Ionisation des interstellaren Gases verantwortliche Quelle ermittelt werden: Durch die unterschiedlichen spektralen Energieverteilungen der Emission von Sternentstehungsgebieten und Quasar-Akkretionsscheiben werden je nach Quelle Zustände unterschiedlichen Ionisationspotentials unterschiedlich stark angeregt, so dass in diesem Diagramm eine Trennlinie zwischen Bereichen von dominierender Sternentstehung und von Quasar-Akkretion gezogen werden kann. Im Falle der Quasare ist die Emission heißer junger Sterne nie allein für die globale Ionisation verantwortlich, immer ist der Quasar zumindest beteiligt. Unabhängig vom morphologischen Galaxientypus dominiert sowohl in Spirals als auch in elliptischen Wirtsgalaxien eine Mischung von Licht aus Sternentstehungsgebieten und Quasarlicht, oder sogar das Quasarlicht allein. Es scheint aber auch einen weiteren Trend zu geben: In den stärker durch Gravitationswechselwirkung oder Galaxienzusammenstöße gestörten Quasarsystemen wird die interstellare Materie eher allein durch den Quasar ionisiert (Abb. III.2.3).

Die Anwesenheit eines Quasars in der Galaxie hat aber auch Auswirkungen auf deren stellare Zusammensetzung. Bereits mit der Analyse der Breitbandfarben konnten gezeigt werden, dass stellare Populationen in Quasar-Wirtsgalaxien immer einen Anteil junger Sterne enthalten. Dies gilt sowohl – nicht unerwartet – für Spiralgalaxien, als überraschenderweise auch für Elliptische oder S0-Galaxien, in denen normalerweise keine oder sehr wenig Sternentstehung abläuft. Auch hier konnten mit der VLT-Spektroskopie mehr Details gewonnen werden. Die stellaren Populationen der untersuchten Quasar-Wirtsgalaxien sind im Mittel typischerweise eine bis zwei Milliarden Jahre alt, dementsprechend ist ihre Sternpopulation zu mehr als 90 Prozent alt und enthält ein paar Prozent etwa hundert Millionen Jahre alter oder noch jüngerer Sterne. Es gibt auch hier eine Tendenz zu jüngeren und blauerer Galaxien bei stärker gestörten Systemen.

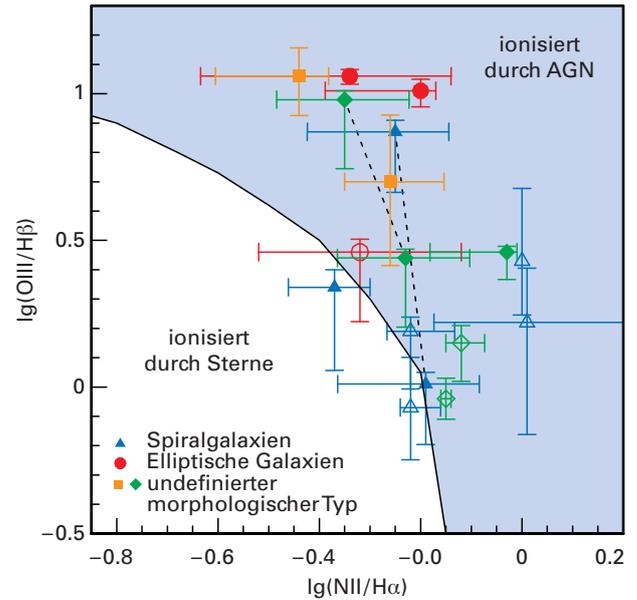


Abb. III.2.3: Diagnostisches »BPT-Diagramm« zur Unterscheidung des dominierenden Ionisationsmechanismus der Wirtsgalaxien einer Stichprobe naher Quasare in Galaxien unterschiedlichen morphologischen Typs: Spiralgalaxien (*Dreiecke*), Elliptische Galaxien (*Kreise*), wechselwirkende Galaxien (*gefüllte Symbole*), ungestörte Systeme (*offene Symbole*). Aus: Letawe et al. 2007, MNRAS, 378, 83.

Kosmische Kollisionen und galaktische Gezeitenarme

Schon seit zwanzig Jahren gibt es die Vermutung, dass Galaxienzusammenstöße die, oder zumindest eine, wichtige treibende Kraft hinter der Versorgung der Schwarzen Löcher mit Materie sein könnten. Bei einem Zusammenstoß und anschließender Verschmelzung zweier Galaxien erzeugen die wirkenden Gezeitenkräfte chaotische Verwirbelungen des interstellaren Gases. Teile desselben werden in Bezug auf das Schwarze Loch in einer Umlaufbahn mit verschwindendem Drehimpuls enden und können damit später in das Schwarze Loch einfallen. Für einige der leuchtkräftigsten Ultraleuchtkräftigen Infrarotgalaxien (*ultra-luminous infrared galaxy*, ULIRG), die einen durch Staub verdeckten Quasar in sich tragen, gilt diese Vermutung mit ziemlicher Sicherheit. Als Gegenpol stehen die leuchtschwächeren, aber von ihrer Kernstruktur identischen Seyfert-Galaxien. Diese sind hauptsächlich Spiralgalaxien, sehr oft ungestört und symmetrisch. Stärkeren Galaxienkollisionen waren diese Galaxien in ihrer nahen Vergangenheit nicht ausgesetzt. Hier spielen Instabilitäten und die Akkretion von kleinen Begleitern die dominierende Rolle.

Wie stark aber Galaxienkollisionen auf einen Quasar wirken können, zeigt Abb. III.2.4 am Beispiel des Quasars HE 0450 – 2958 und seiner Umgebung. Dieses System bei $z = 0.285$ ist schon in den 1980er Jahren als ULIRG klassifiziert worden und enthält einen leuchtkräftigen Quasar. Im sichtbaren Licht mit dem HST/

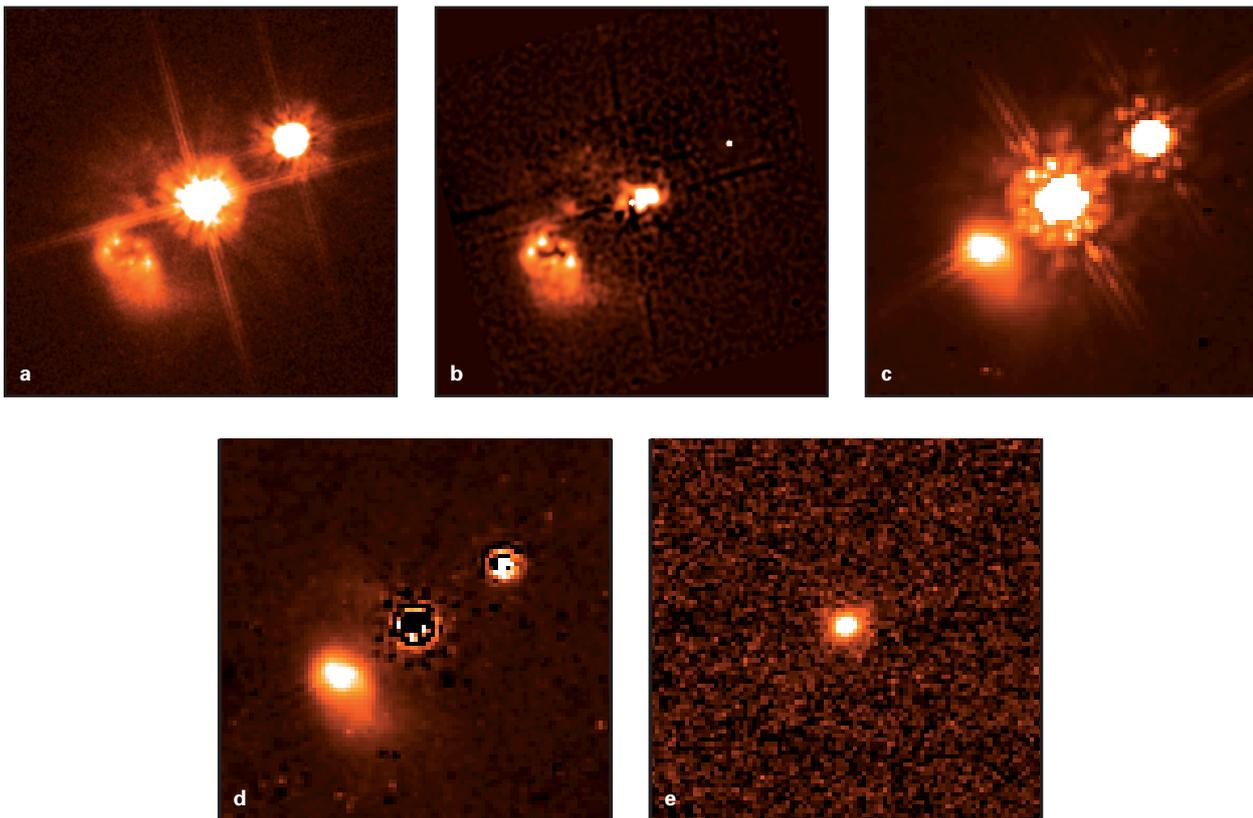


Abb. III.2.4: Der Quasar HE 0450–2958, bei drei Wellenlängen räumlich hoch aufgelöst, *a*) im Visuellen (V-Band, aufgenommen mit der ACS-HRC-Kamera des HST), *c*) im nahen Infraroten (*H*-Band, aufgenommen mit der NICMOS-NIC2-Kamera des HST), *e*) im mittleren Infraroten (*N*-Band, aufgenommen mit VISIR am Eso VLT. Das System HE 0450–2958

besteht aus einem Quasar bei $z = 0.285$ in der Mitte, einer mit dem Quasar wechselwirkenden benachbarten Galaxie links und einem Vordergrundstern unserer Milchstraße rechts. Die Bilder *b*) und *d*) entstanden aus *a*) bzw. *c*) nach Abzug einer modellierten Punktquelle für Quasarkern und Vordergrundstern (Jahnke et al. 2008).

ACS aufgenommen (*a*, *b*), zeigt die Begleitgalaxie im Südosten nicht nur starke Gezeitenarme in Richtung des Quasars, sondern auch »Löcher« in ihrer Mitte. Das HST-Bild im nahen Infraroten (*c*, *d*) zeigt, dass diese Löcher nicht durch fehlende Emission entstehen, sondern dass das emittierte Licht hier durch Staub absorbiert wurde. In keinem der beiden Fällen ist eine ausgedehnte Wirtsgalaxie sichtbar, sondern nur die leuchtkräftige, staubige Begleitgalaxie sowie Gezeitenausläufer. Zusammen mit dem $10.3\text{-}\mu\text{m}$ -Bild (*e*), in dem nur der Quasarkern, aber weder Begleitgalaxie noch Stern sichtbar sind, ergibt dies ein konsistentes Bild, in dem Quasar und Begleitgalaxie gerade zusammenstoßen und damit in der Begleitgalaxie massenhafte Sternentstehung von ca. 300 Sonnenmassen pro Jahr alle Energie erzeugen, während die Quasar-Emission primär durch Akkretion gespeist wird.

Zusammen mit Informationen über die CO-Emission zeigen diese Daten, dass sowohl der Quasar als auch die Begleitgalaxie eine ULIRG-mäßige Leuchtkraft besitzen: Der Quasar ist von etwas Staub und einer recht massearmen Wirtsgalaxie umgeben und sein direk-

tes Umfeld emittiert reprozesiertes Quasarlicht auf ULIRG-Niveau. Die Begleitgalaxie ist ihrerseits sehr staubreich, produziert aber etwa 300 Sonnenmassen pro Jahr an neuen Sternen. Die hierdurch abgestrahlte Leuchtkraft und die große Staubmenge sorgen ebenfalls für Infrarotemission von ULIRG-Stärke. In diesem System spielt die Wechselwirkung des Quasars mit seiner Begleitgalaxie ziemlich sicher eine große Rolle, sowohl bei Auslösung der massiven Sternentstehung, als auch der Kernaktivität. Nur die Kombination der höchsten räumlichen Auflösung von HST und VLT mit Multi-Wellenlängendaten erlaubte eine Analyse dieser verschiedensten physikalischen Prozesse.

HST und Cosmos

Nach dem MPIA-geführten GEMS-Projekt (Leitung: Hans-Walter Rix) ist COSMOS (Cosmic Evolution Survey) das nächste und größere Projekt mit dem HST, unter anderem mit dem Ziel, dem Wesen der Quasare und ihrer Wirtsgalaxien auf die Spur zu kommen. An COSMOS

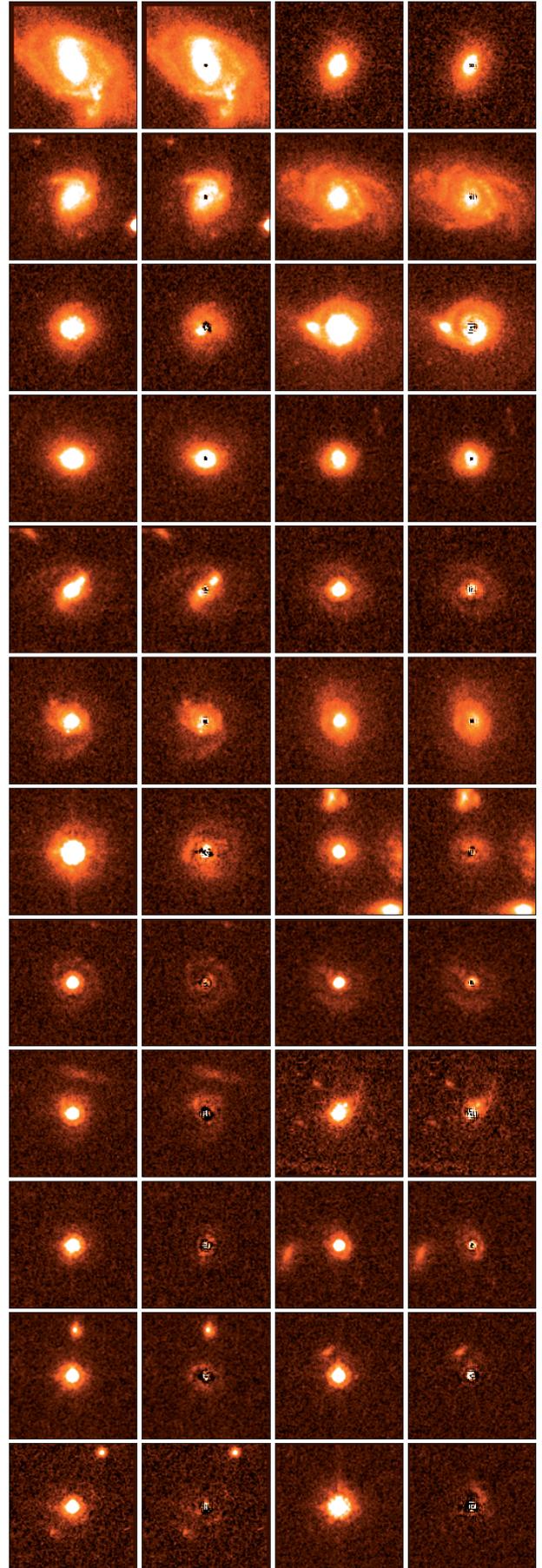
sind mehr als hundert Wissenschaftler aus den USA, Italien, Frankreich, Deutschland, der Schweiz und anderen Ländern beteiligt. Mit dem HST wurde ein zwei Quadratgrad großer Himmelsbereich mit der höchstmöglichen Auflösung (0.04 Bogensekunden pro Pixel) im *I*-Band abgebildet. Dieser Datensatz als Kern wird flankiert von Röntgenaufnahmen der Satelliten XMM/NEWTON und CHANDRA, Infrarotbildern von SPITZER, bodengebundenen Aufnahmen in mehr als 30 optischen und nahinfraroten Filterbändern, bis hin zum Millimeter- und Radiobereich, letzteres wiederum MPIA-geführt mit dem Very Large Array (Leitung: Eva Schinnerer), und Spektroskopie mit dem VLT und mit Magellan.

Die Untersuchung von Quasar-Wirtgalaxien als einer von zahlreichen Aspekten des COSMOS-Projekts wird hauptsächlich von den Röntgen- und HST-Aufnahmen getragen. Für die größte jemals durchgeführte Analyse stehen HST-Aufnahmen einer Stichprobe von mehreren hundert AGN und Quasaren zur Verfügung. Einige Beispiele mit Rotverschiebungen zwischen $z = 0.35$ und $z = 2$ zeigt Abb. III.2.5. Bei diesen höchsten Rotverschiebungen treffen die Bilder an ihre Grenzen, da der beobachtete Ruhewellenlängenbereich im Ultravioletten liegt, in dem nur noch Gebiete starker Sternentstehung zu sehen sind, nicht aber alte Sternpopulationen. Nach Subtraktion des Quasarkerns zeigen die Galaxienbilder häufig eine asymmetrische, selten jedoch vollständig gestörte Struktur. Kleinere Begleiter sind häufig, aber es zeigen sich auch weitgehend ungestörte Systeme. Eine erste Analyse im Vergleich zu inaktiven normalen Galaxien zeigt keine besondere Überhäufigkeit von Störungen bei Quasaren dieser mittleren Leuchtkräfte.

Die ($M_{\text{SL}} : M_{\text{Gal}}$)-Beziehung zwischen der Masse des Schwarzen Lochs und der Masse des Bulge

Mittlerweile ist in groben Zügen klar, welche Galaxien Quasare beherbergen: Alle massereichen Galaxien mit einem Bulge besitzen ein zentrales, massereiches Schwarzes Loch und können in eine Quasaphase eintreten, oder sind es wahrscheinlich schon. Die einzige Voraussetzung ist das Vorhandensein von akkretierbarem Gas, das ins Zentrum gelangen muss. Die genauen physikalischen Prozesse, die zur Akkretion aus der Galaxie in ihr zentrales Schwarzes Loch führen, sind aber weiterhin unklar. Simulationen der Beziehung $M_{\text{SL}} \sim M_{\text{Gal}}$ basieren

Abb. III.2.5: Quasare und ihre Wirtgalaxien, aufgenommen mit dem HST im Rahmen des COSMOS-Projekts. Diese Auswahl von 24 aus insgesamt ca. 300 Quasaren zeigt Objekte bei Rotverschiebungen von $z = 0.35$ (*oben*) bis $z \approx 2$ (*unten*). In jedem Bildpaar zeigt das linke das Originalbild, das rechte die Wirtgalaxie nach Abzug einer Punktquelle. Die Quasare wurden mit der ACS/WFC Kamera des HST im *I*-Band aufgenommen. (Jahnke, COSMOS et al. 2008, in Vorbereitung).



nicht auf fundamentaler Physik, sondern beinhalten weiterhin Ad-hoc-Annahmen.

Eine der besten diagnostischen Möglichkeiten, bestehende Modelle einzuschränken, ist zu untersuchen, wie sich das Verhältnis der Massen von Schwarzen Löchern und Galaxienbulges mit der kosmischen Zeit verändert hat. Unterschiedliche physikalische Mechanismen sind notwendig, um z.B. ein Verhältnis $M_{\text{SL}} : M_{\text{Gal}} = 1 : 700$ aufrecht zu erhalten, wie es im lokalen Universum beobachtet wird, oder um jeweils Schwarze Löcher oder Galaxien früher wachsen zu lassen. Dieses Verhältnis $M_{\text{SL}} : M_{\text{Gal}}$ ist bereits im lokalen Universum nicht einfach zu bestimmen, bei größeren Rotverschiebungen wird es eine echte Herausforderung. Bei größeren Rotverschiebungen sind die einzigen Galaxien, bei denen die Masse des Schwarzen Loches bestimmt werden kann, Quasar-Wirtsgalaxien. Die breiten Emissionslinien des Quasars in Kombination mit der Leuchtkraft erlauben die Abschätzung von $M_{\text{SL}} : M_{\text{Gal}}$ bis auf einen Faktor 3–4. Sie bedingen aber gleichzeitig, dass die Galaxien nur mit den für die Spektroskopie beschriebenen Schwierigkeiten analysiert werden können, die genauso für Bilddaten gelten.

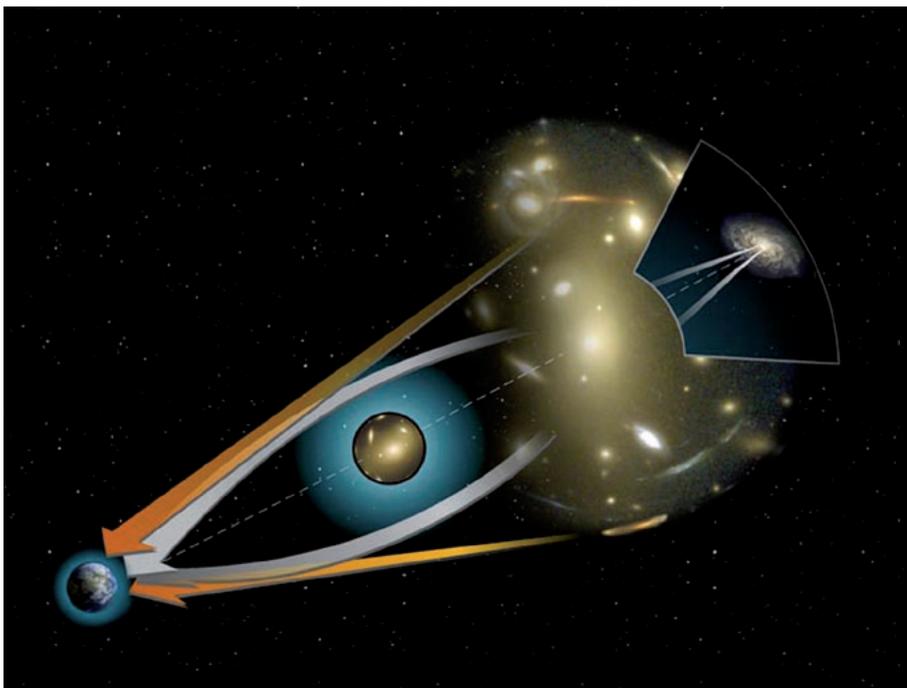
In einem der ersten und besten Versuche in dieser Richtung wird die Leuchtkraft von durch den Gravitationslinseneffekt (Abb. III.2.6) verstärkten Wirtsgalaxien von Quasaren benutzt, um mittels Annahmen über ihre stellaren Populationen deren Masse abzuschätzen (Abb. III.2.7). Es ergeben sich zumindest bis $z = 1.7$

keine starken Hinweise auf eine Veränderung des Verhältnisses $M_{\text{SL}} : M_{\text{Gal}}$. Das Verhältnis scheint konsistent mit dem heutigen Wert. Erst jenseits von $z = 1.7$ gibt es Anzeichen, dass Schwarze Löcher im Vergleich zu ihren Galaxien im frühen Universum massereicher waren als heutzutage. Demnach wären zuerst die Schwarzen Löcher schnell gewachsen – ihre Wirtsgalaxien hätten ihre Massen erst später und langsamer aufgebaut.

Die Unsicherheiten bei dieser Methode sind jedoch auch aufgrund von Auswahleffekten immer noch so groß, dass diese Ergebnisse möglicherweise nicht signifikant sind. Weitere, methodisch unabhängige Ansätze sind notwendig, um bei diesen und anderen Rotverschiebungen ein kohärentes Bild zu erhalten. Die Astronomen des MPIA haben zu diesem Zweck unter anderem ein Beobachtungsprogramm mit VLT und SINFONI, dem Nahinfrarot-Integralfeldspektrographen mit Kamera, gestartet; dazu verwendeten sie garantierte Beobachtungszeit des MPIA aus dem Bau der Laser-Leiteinrichtung PARSEC, die SINFONI unterstützt. Ziel ist die Bestimmung von dynamischen Galaxienmassen für erst einmal vier Quasare, drei davon gravitationsgelist. Mit SINFONI wird ausgedehnte Linienemission in der Wirtsgalaxie vermessen, um das dortige Geschwindigkeitsfeld abzuleiten und damit die eingeschlossenen Massen dynamisch zu bestimmen. Diese Methode unterscheidet sich prinzipiell von dem oben beschriebenen Ansatz und ist auch komplementär zu den Massenbestimmungen über die Abschätzung des

Abb. III.2.6: Der Gravitationslinseneffekt. Die Masse einer Galaxie oder eines Galaxienhaufens lenkt das Licht einer Hintergrundgalaxie (*rechts oben*) auf dem Weg zum Beobachter (*links unten*) so ab, dass mehrere Bilder entstehen. Dabei be-

wirkt die Gravitationslinse eine Verstärkung des Lichts und eine Vergrößerung der Winkelskalen. Dadurch sind schwächere und kleinere Systeme zugänglich.



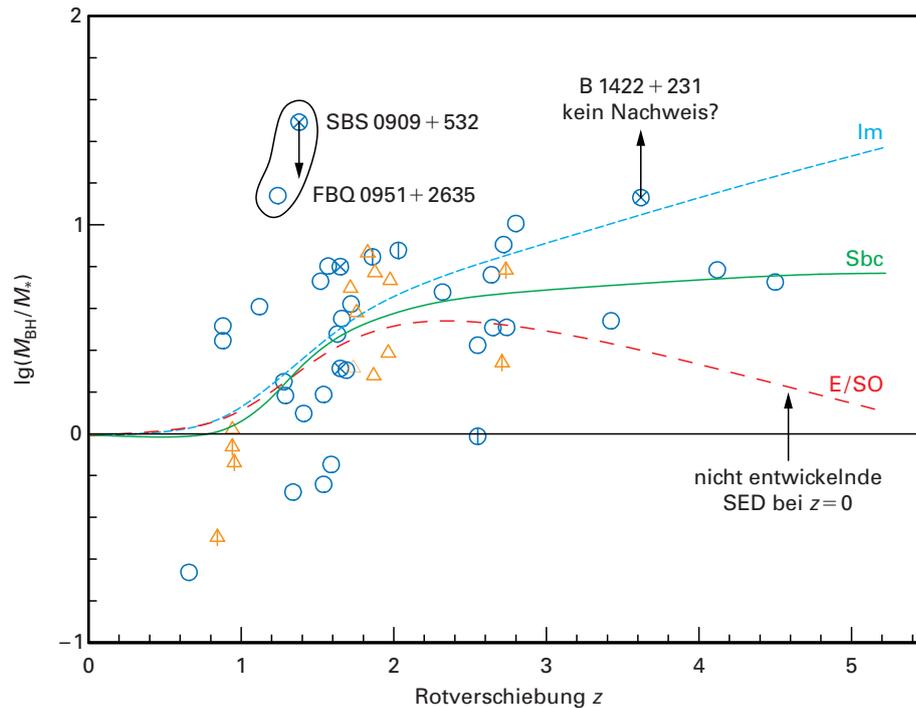


Abb. III.2.7: Erste Ergebnisse über die zeitliche Entwicklung des Verhältnisses $M_{\text{SL}} : M_{\text{Gal}}$ mit der Zeit (Peng et al., 2006, ApJ, 649, 616) bei gravitationsgelinsten Quasaren unter Nutzung von Annahmen über ihre stellaren Populationen: Danach

ändert sich dieses Verhältnis bis $z = 1.7$ nicht nachweisbar, jenseits dieser Zeit gibt es aber Anzeichen für eine Entwicklung hin zu massereicheren Schwarzen Löchern bei gegebener Galaxienmasse, im Vergleich zu heute.

Masse/Leuchtkraft-Verhältnisses, die parallel im Rahmen des COSMOS-Projekts versucht wird.

In Abb. III.2.8 ist eines der Linsensysteme dargestellt. Die Abbildung zeigt das HST-Bild eines gelinsten Quasars, aus dem bereits ein detailliertes Linsenmodell abgeleitet wurde. Solche Modelle erlauben das Rückrechnen eines gemessenen Geschwindigkeitsfeldes zurück in die Quellenebene und damit eine dynamische Bestimmung der Massen. Die ersten Daten für dieses Projekt wurden bereits aufgenommen und werden zur Zeit analysiert. Es zeigt sich, dass, wie in der Planung berechnet, die Beobachtungen selbst für ein 8-m-Teleskop wie das VLT eine Herausforderung sind und es einer sehr präzisen Kalibration bedarf, um belastbare Resultate zu erhalten. Der Rotverschiebungsbereich, in dem sich mittels dieser Methode die Massen der Wirtsgalaxien bestimmen lassen, wird mit heutigen Teleskopen $z = 2$ sicherlich nicht deutlich überschreiten.

Blick in die goldene Zukunft

Zwar ist abzusehen, dass man in den nächsten Jahren die Entwicklung der $(M_{\text{SL}} : M_{\text{Gal}})$ -Relation zumindest bis $z = 2$ gut einschränken können, aber die Schwarzen Löcher in den massereichsten Galaxien stammen aus einer früheren Epoche. Für eine massenabhängige Analyse die-

ser Relation bedarf es daher eines Blickes bis zu deutlich höheren Rotverschiebungen, vermutlich um $z = 6$ bis 7, als die ersten supermassereichen Schwarzen Löcher entstanden sind. Während es derzeit nur ganz wenige, wenn auch sehr interessante Anhaltspunkte zu diesen Zeiten aus CO-Beobachtungen gibt (vergleiche Jahresberichte 2004 und 2006), werden die nächsten Jahre einige sehr interessante Instrumente für genau diesen Zweck bringen.

Das Atacama Large Millimeter Array (ALMA) wird derzeit sukzessive aufgebaut und im Betrieb ab 2009 im Submillimeter-Wellenlängenbereich Auflösungen bis zu 0.005 Bogensekunden erreichen. Das James Webb Space Telescope wird als Nachfolger des HST ab 2013 mit seiner im nahen Infraroten bisher unerreichten räumlichen Auflösung und Empfindlichkeit auch bei sehr großen Entfernungen neue Einblicke in die Zentren aktiver Galaxien erlauben. Und am Large Binocular Telescope wird das am MPIA entwickelte abbildende Interferometer LINC/NIRVANA die noch bessere räumliche Auflösung eines 23-m-Teleskopes erreichen.

Insgesamt werden in den nächsten fünf Jahren vollkommen neuartige Instrumente zur Verfügung stehen, die neue Einblicke erlauben werden. damit sollte sich herausfinden lassen, ob zuerst die supermassereichen Schwarzen Löcher entstanden sind, oder die Galaxien, in denen sie leben.

Knud Jahnke, Hans-Walter Rix

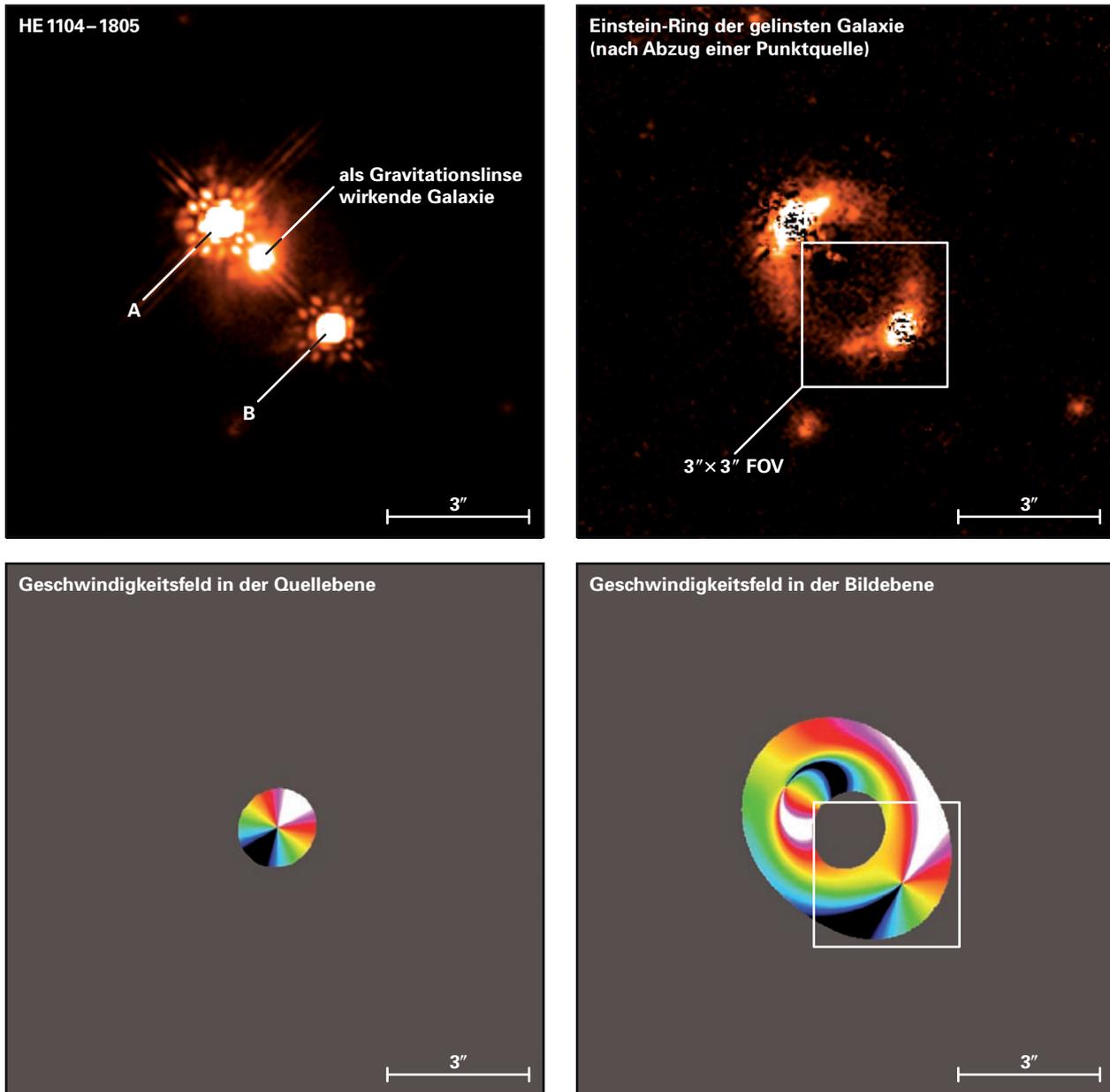


Abb. III.2.8: Das Linsensystem HE 1104 – 1805. *Links oben:* das optische Bild (HST); *rechts oben* das Bild der Wirtsgalaxie nach Abzug des Quasarkerns, annähernd zu einem Einstein-Ring auseinandergezogen; *rechts unten* ein mögliches Geschwindigkeitsfeld entsprechend dem Linsenmodell; und *links unten* das in die Quellebene zurückgerechnete Geschwindigkeitsfeld.

*In Zusammenarbeit mit:
Astrophysikalisches Institut Potsdam,
Universität Liege,
EPFL Lausanne,
Space Telescope Science Institute,
und den GEMS und COSMOS-Projekten*

III.3 Chemie in protoplanetaren Scheiben

In diesem Kapitel behandeln wir die neuesten Erkenntnisse in Bezug auf die chemische Entwicklung protoplanetarer Scheiben und des solaren Urnebels, die mit radiointerferometrischen Beobachtungen und theoretischen Modellrechnungen gewonnen wurden. Wir stellen jüngste Beobachtungen der physikalischen Struktur und der chemischen Zusammensetzung des Gases und des Staubs in diesen Scheiben vor und behandeln einige der neuesten am MPIA erzielten Ergebnisse.

Zunächst untersuchen wir die Entstehung präbiotischer organischer Moleküle in den planetenbildenden Regionen kurz vor der Entstehung der Planeten. Wir prognostizieren, dass einige CO-haltige Spezies wie etwa H_2CO aufgrund der hochenergetischen Sternenstrahlung und der chemischen Prozesse auf Staubkorn-Oberflächen in inneren Regionen wachsender protoplanetarer Scheiben unterhäufig sein können. Darüber hinaus sagen wir voraus, wie protoplanetare Scheiben um massearme junge Sterne im Licht der mit dem ALMA-Interferometer beobachteten Moleküllinien erscheinen. Wir geben Moleküle und deren Linien an, die sich zur Untersuchung der Scheiben und zur Unterscheidung zwischen Effekten der chemischen Schichtung und der physischen Scheibenstruktur eignen. Darüber hinaus werden die notwendigen Anforderungen an die ALMA-Beobachtungen spezifiziert.

Einleitung

Der Ursprung und die Entwicklung des Lebens sind eng mit der Chemie komplexer kohlenstoffhaltiger Moleküle verbunden. Während der Übergang von Makromolekülen zu den einfachsten Lebensformen wahrscheinlich auf der Erde erfolgte, wissen wir noch nicht, wie komplex die organischen Moleküle waren, die während der Aufbauphase der primordialen bzw. sekundären Erdatmosphäre und der Ozeane zur Verfügung standen. Während der letzten Jahrzehnte wurden im interstellaren Raum eine Vielzahl von Spezies, einschließlich Alkohole (z.B. CH_3OH), Ether (z.B. CH_3OCH_3) und Säuren (z.B. HCOOH) mit Atommassen von einigen Hundert entdeckt; (eine aktuelle Übersicht ist in Snyder 2006 enthalten). Ein Vorläufer der Aminosäuren, Aminoacetonitril, und die einfachste Zuckerform, Glycolaldehyd, wurden in der sternbildenden Region Sagittarius B₂ (N) (Hollis et al. 2004, Belloche et al. 2008) entdeckt. Viele einfache Bausteine präbiotischer Moleküle existieren also im Weltraum. Hier stellt sich natürlich die Frage, was mit diesen Spezies während der prästellaren Phase, in den dichten Kernen von Molekülwolken, beim Durchgang

eines Akkretionsschocks oder in einer protoplanetaren Scheibe passiert. Sind in der zirkumstellaren Scheibe zu Beginn der Planetenentstehung organische Moleküle in großer Zahl vorhanden? Könnten sich solche Moleküle bilden und in so lebensfeindlichen Umgebungen wie den Akkretionsscheiben überleben?

Trotz der Vielzahl der interstellaren Moleküle wurden nur Formaldehyd (H_2CO) und einige andere nicht organische Spezies mit Interferometern in einigen nahegelegenen protoplanetaren Scheiben entdeckt und räumlich aufgelöst (z.B. Dutrey et al. 1997, Kastner et al. 1997, Aikawa et al. 2003, Qi et al. 2003, Dutrey et al. 2007 b). Diese Multimolekül-/Multiübergangsstudien ermöglichten die Eingrenzung der grundlegenden Scheibenparameter wie der Radien, der Massen, der Kinematik, der Temperatur und der Dichteprofile, des Ionisationsgrads und der Abbaufaktoren (z.B. Dartois et al. 2003, Semenov et al. 2005, Qi et al. 2006, Piétu et al. 2007, Qi et al. 2008). Mit Hilfe hoch entwickelter chemischer Modelle und indirekter Beobachtungsnachweise kann man Hinweise auf die Existenz anderer oder noch unentdeckter organischer Moleküle in Scheiben sowie deren Häufigkeit erhalten.

Es wird heute allgemein angenommen, dass die Entstehung komplexer (organischer) Moleküle bereits in kalten dichten Wolkenkernen auf Staubkornoberflächen beginnt, die als Katalysatoren für viele exotherme Reaktionen zwischen Radikalen und leichten Atomen dienen, wobei Formaldehyd einer der Ausgangsstoffe für komplexe organische Moleküle ist. Die neu produzierte Spezies kann eventuell entweder während der Aufheizungsphase nach der Entstehung des zentralen Sterns (Garrod & Herbst 2006) oder durch einige thermische/nicht thermische Desorptionsmechanismen wie kosmische Strahlung/Röntgenstrahlen oder die UV-Erwärmung von Körnern in den gasförmigen Zustand zurückversetzt werden (d'Hendecourt et al. 1982, Leger et al. 1985, Shalabiea & Greenberg 1994, Najita et al. 2001, Garrod et al. 2007).

Die Umwandlung einer Wolke in eine aktiv akkretierende Scheibe, verursacht durch Gravitationskollaps und Drehimpulstransport, verändert die Zusammensetzung des Gases und des Staubs während des Durchgangs durch eine Schockfront weiter (Lada 1985, Hassel 2004). Darüber hinaus kann auch der dynamische Transport in Akkretionsscheiben das Gas durch Verdampfung von Eismänteln in wärmeren, weniger undurchsichtigen Regionen mit komplexen Spezies anreichern (Willacy et al. 2006, Semenov et al. 2006). Die UV-Strahlung des Sterns und das interstellare Strahlungsfeld spielen eine wesentliche Rolle für die Scheibenchemie, da sie Mo-

leküle dissoziieren und ionisieren und das Gas über der Mittelebene aufheizen, wo viele Moleküllinien erzeugt werden (z.B. van Zadelhoff et al. 2003). Die Scheibenchemie selbst kann zur Produktion komplexer organischer Moleküle führen.

Die kürzliche Entdeckung von NeII-Linien-Emissionen verschiedener protoplanetarer Scheiben durch SPITZER (Pascucci et al. 2007) unterstützt die theoretischen Prognosen von Glassgold et al. (2007), wonach die äußeren Scheibenteile durch die intensive Röntgenstrahlung eines jungen Sterns ionisiert und aufgeheizt werden können. Diese thermische Bremsstrahlung wird wahrscheinlich von den Rekonnexionsschleifen in der stellaren Korona in Entfernungen von bis zu 0.1 AE vom Stern erzeugt und vermag tief in die innere Scheibenregion einzudringen – den Bereich, in dem die Planeten entstehen (z.B. Igea & Glassgold 1999). Diese Röntgenstrahlung ionisiert Heliumatome, die das CO zerstören und das Scheibengas mit ionisiertem atomarem Kohlenstoff auffüllen. Dies führt zur Bildung schwerer Cyanopolyine und langer Kohlenstoffketten – teilweise auf Oberflächen von Staubkörnern –, die einen wesentlichen Teil des natürlichen Kohlenstoffs in der inneren Scheibenregion binden können (Semenov et al. 2004). Deshalb ist es von größter Wichtigkeit, mit Hilfe hochentwickelter theoretischer Simulationen und hochwertiger Beobachtungsdaten herauszubekommen, welche Mechanismen und Prozesse während der verschiedenen Phasen der protoplanetaren Scheibenentwicklung von Bedeutung sind.

Im Rahmen der Kollaboration »Chemistry in Disks« (CID) zwischen Gruppen in Heidelberg, Bordeaux, Paris und Jena haben Astronomen des MPIA ein Programm zur Untersuchung und Charakterisierung der chemischen Entwicklung und der physikalischen Eigenschaften naher protoplanetarer Scheiben um junge Sterne mit unterschiedlichen Massen und Altersstufen initiiert (siehe z.B. Dutrey et al. 2007 b). Eines der verschiedenen Projektziele bestand in der Suche nach den Emissionslinien der Vorläufer komplexer organischer Moleküle. Hierbei fanden sie die Scheibe um den massearmen Stern DM Tau in der $H_2C(3-2)$ -Linie und lösten sie mit dem Plateau de Bure-Interferometer (wenn auch mit einem bescheidenen Signal-Rausch-Verhältnis von 3 : 5) auf. Sie stellten fest, dass die H_2CO -Emission keinen zentralen Peak aufweist wie das Staubkontinuum, sondern eine asymmetrische ringähnliche Struktur mit einem größeren inneren »Loch« von 100 AE besitzt. Die hochauflösenden Beobachtungen von DM Tau mit dem IRAM-Interferometer durch Dartois et al. (2003) and Piétu et al. (2007) zeigten keinen zentralen Abfall in der CO-Linie oder im Staubkontinuum.

Das Problem der Auflösung nahegelegener protoplanetarer Scheiben in Moleküllinien mit einem guten Signal-Rausch-Verhältnis wird drastisch reduziert werden, wenn das mit 50 12-m-Antennen ausgestattete Atacama Large Millimeter Array (ALMA) im Jahr 2012 in Betrieb genommen wird. ALMA wird in der Lage sein,

Bilder protoplanetarer Scheiben in einem Frequenzbereich zwischen 100 und 950 GHz mit einer räumlichen Auflösung von bis zu $0.04-0.005''$ zu erfassen. Dies ermöglicht die direkte Erkennung und Charakterisierung von Scheibeninstabilitäten, die klumpige Strukturen (Verwirbelungen, »Spiralarme« etc.) erzeugen, sowie von inneren Lücken und Löchern durch entstehende Riesenplaneten (Wolf et al. 2002, Wolf & Klahr 2002, Narayanan 2006). Die großflächige chemische Struktur protoplanetarer Scheiben wird im Lichte der Rotationsübergänge vieler reichlich vorhandener Moleküle zugänglich sein. Wie von Pavlyuchenkov et al. (2007) demonstriert, kann die Anregung von Moleküllinien in Scheiben mit starken Gradienten physikalischer Bedingungen und chemischer Strukturen ein komplizierter und schwer zu interpretierender Prozess sein.

In diesem Kapitel stellen die Astronomen das aktuelle Wissen über die Chemie in Scheiben dar und sagen voraus, dass das innere H_2CO -Loch, sofern es wirklich existiert, wahrscheinlich durch chemische Effekte verursacht wird. Darüber hinaus untersuchen sie das Potenzial von ALMA zur Unterscheidung zwischen verschiedenen thermischen und chemischen Effekten in protoplanetaren Scheiben und schätzen die für dieses Ziel benötigte räumliche Auflösung und Integrationszeit ab.

Beobachtungsfakten

Bisher wurden im Weltraum mehr als 150 Moleküle entdeckt, von denen nur ein kleiner Teil mit Hilfe der Millimeter-Interferometrie in planetenbildenden Scheiben nachgewiesen wurde: CO und seine Isotope, CN, HCN, DCN, HNC, H_2CO , C_2H , CS, HCO^+ , $H^{13}CO^+$, DCO^+ und N_2H^+ (Dutrey et al. 1997, Kastner et al. 1997, Aikawa et al. 2003, Dutrey et al. 2007 a, Qi et al. 2008). Einige helle und große Scheiben wie die um DM Tau, LkCa 15 und MWC 480 wurden eingehend in einem Dutzend Molekülübergängen und in der thermischen Emission ihres Staubes untersucht. Die Analyse dieser Linien- und Kontinuumsdaten ermöglichte es uns, Scheibengrößen, Ausrichtungen, Kinematik, Temperaturverteilungen, Flächendichten und molekulare Säulendichten abzuleiten (z.B. Dartois et al. 2003, Qi et al. 2006, Isella et al. 2007, Piétu et al. 2007).

Die Linien des reichlich vorhandenen CO-Moleküls dienen zur Untersuchung der Scheibengeometrie sowie der thermischen Struktur, der Flächendichtenverteilung und der Kinematik. Aufgrund der selektiven Photodissoziation erscheinen die Scheiben in dem Staubkontinuum und den $C^{18}O$ -, ^{13}CO - und ^{12}CO -Linien zunehmend größer, mit typischen Radien von 300 bis 1000 AE (Dutrey et al. 2007a). Eine wichtige Erkenntnis besteht in der Existenz vertikaler Temperaturgradienten in vielen Scheiben, wie durch die physikalischen Simulationen vorhergesagt, obwohl einige Scheiben mit größeren inneren Hohlräumen keinen Hinweis auf einen solchen Gra-

dienten bieten (z.B. GM Aur). Die Scheiben um die heißeren Herbig Ae/Be-Sterne sind systematisch heißer als die Scheiben um die kühlen, sonnenähnlichen T-Tauri-Sterne. Qi et al. (2006) fanden kürzlich heraus, dass die beobachteten Intensitätsverhältnisse der niedrigen zu den hohen CO-Linien in den TW-Hya-Scheiben auf eine zusätzliche Heizquelle schließen lassen, die aus stellarer Röntgenstrahlung bestehen könnte.

Die beobachteten C_2H -, CN- und HCN-Linien hängen von den Eigenschaften der auftreffenden UV-Strahlung und insbesondere von dem in den Lyman-Linien emittierten Teil der gesamten UV-Leuchtkraft ab (Bergin et al. 2003). Das beobachtete Verhältnis der CN- zur HCN-Säulendichte in Scheiben ist typisch für photonendominierte Chemie, wie durch die chemischen Modelle prognostiziert (Chapillon et al. 2008, in Vorbereitung). Molekulare Ionen (HCO^+ und N_2H^+) sind die dominanten Ladungsträger auf mittlerer Höhe in den Scheiben und deren Beobachtung ermöglicht die Eingrenzung des Ionisationsgrades in diesen Bereichen mit einem typischen Wert von 10^{-8} (Qi et al. 2003, Dutrey et al. 2007 b). Die beobachteten Verhältnisse von DCO^+ - zu HCO^+ - und DCN- zu HCN-Säulendichten ergeben viel höhere D/H-Werte als den kosmischen Wert von 0.01 %, sodass die Deuterium-Fraktionierung in Scheiben effizient sein muss (Qi et al. 2008).

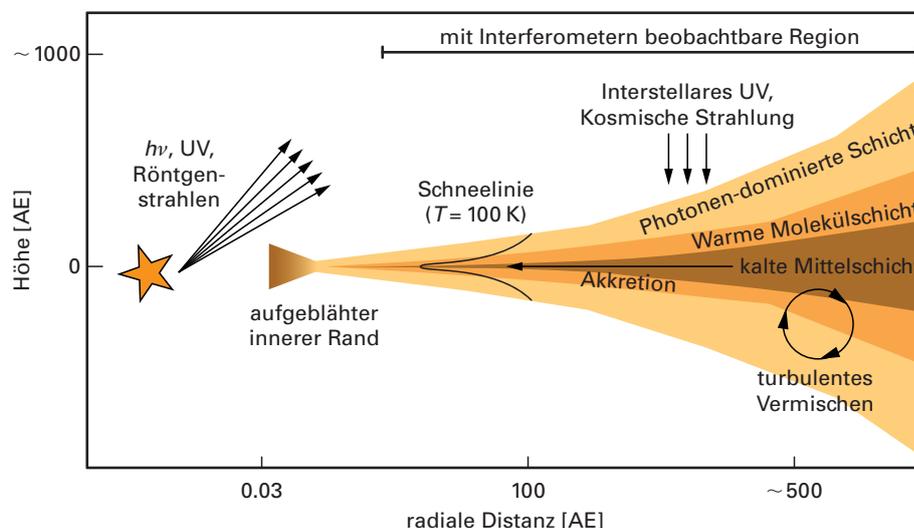
Im allgemeinen sind die beobachteten molekularen Häufigkeiten in protoplanetaren Scheiben im Vergleich zu den Werten in der Taurus-Molekülwolke um das 5-

bis 100-fache geringer – wahrscheinlich durch effizientes Ausfrieren und Photodissoziation. Verblüffend ist die Beobachtung, dass in den Scheiben von DM Tau und LkCa 15 ein erhebliches Reservoir an sehr kaltem CO- und HCO^+ -Gas bei Temperaturen von 13 bis 17 K und damit unterhalb der Ausfrieretemperatur von CO (20 K) existiert. Konventionelle chemische Modelle können diese Tatsache nicht erklären, ohne sich auf einen nichtthermischen Desorptionsmechanismus zu berufen, der in der dunklen Mittelebene der Scheibe aktiv ist – wie etwa eine effiziente turbulente Diffusion und UV-Photodesorption, angetrieben von Teilchen der kosmischen Strahlung (Semenov et al. 2006, Oeberg et al. 2007).

Beobachtungen der Staub-Wärmeemission bei (Sub-) Millimeter- und Zentimeter-Wellenlängen werden genutzt, um den Anstieg der Wellenlängenabhängigkeit der Staubeextinction zu messen, der ein präziser Indikator für das Kornwachstum und die Sedimentierung in Scheiben ist (z.B. Rodmann et al. 2006). Es bestehen starke Anhaltspunkte dafür, dass in entwickelten Scheiben mit einem Alter von einigen Millionen Jahren Staubkörner auf Kieselgröße anwachsen. Die Ergebnisse des Infrared Space Observatory (ISO) und von SPITZER zeigen die Existenz einer erheblichen Menge an gefrorenem Material und eine große Vielzahl amorpher und kristalliner Silikate sowie PAH in Scheiben (z.B. van den Ancker et al. 2000, van Dishoeck 2004, Bouwman et al. 2008). Die PAH-Emissionbanden bei Nah- und Mittel-Infrarotwellenlängen werden durch das einfallende stel-

Abb. III.3.1: Die physikalische und chemische Struktur einer protoplanetaren Scheibe. In der dunklen, dichten und kalten Mittelebene befinden sich die meisten Moleküle auf Staubkörnern und die chemische Entwicklung wird von Ionen-, Molekül- und Oberflächenreaktionen beherrscht. Diese Region weist den geringsten Ionisationsgrad auf und Staubkörner bilden die häufigste geladene Spezies. Über der Mittelebene befindet sich eine wärmere Zwischenschicht, die von mäßiger UV-Strahlung aufgeheizt wird. Hier können viele Reaktionen

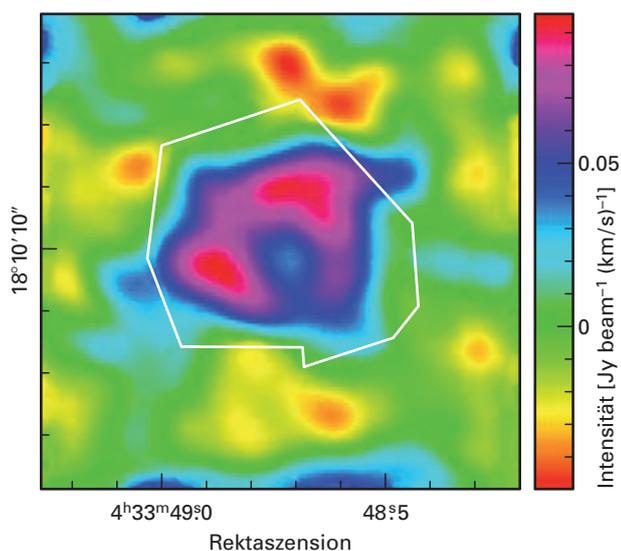
mit Barrieren ablaufen und eine Vielzahl unterschiedlicher Moleküle existiert in der Gasphase. Dies ist die Zone, in der die meisten Moleküllinien entstehen. Der Ionisationsgrad in der Zwischenschicht wird von einer Vielzahl molekularer Ionen und insbesondere HCO^+ bestimmt. Weiter oben befindet sich eine heiße, hochionisierte Atmosphäre, in der außer H_2 nur die einfachsten Radikale und Ionen überleben. In dieser Region ist ionisierter Kohlenstoff in großen Mengen vorhanden und es werden C^+ -Emissionslinien angeregt.



lare Strahlungsfeld angeregt und hängen deshalb von der vertikalen Struktur und dem Turbulenzzustand der Scheibe ab (Dullemond et al. 2007). Diese Linien lassen sich leichter in Scheiben um heiße Herbig Ae / Be-Sterne mittlerer Masse als bei kühlen, sonnenähnlichen T-Tauri-Sternen beobachten (z.B. Acke & van den Ancker 2004, Geers et al. 2007, Sicilia-Aguilar et al. 2007).

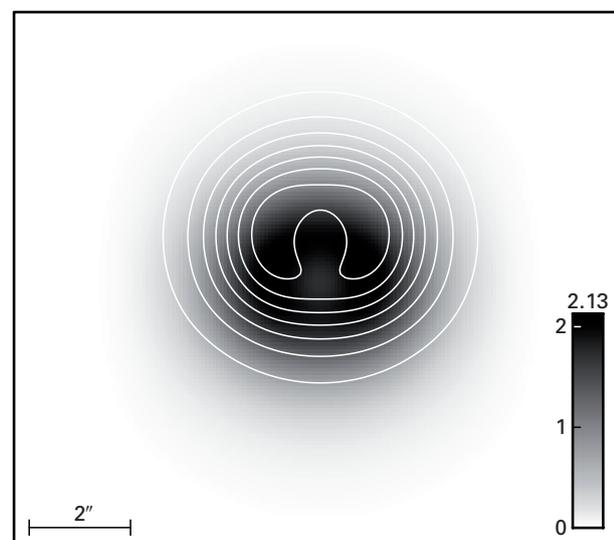
Verschiedene, bei $10 - 30 \mu\text{m}$ in Emission beobachtete Bänder gehören zu amorphen und kristallinen Silikaten bei Temperaturen zwischen 100 und 300 Kelvin mit variierenden Fe / Mg-Verhältnissen, sowie Kornstruktur und -größe (z.B. van Boekel et al. 2004, Natta et al. 2007, Bouwman et al. 2008, Voshchinnikov & Henning 2008). Die Zusammensetzung des heißen Gases in der inneren Scheibe lässt sich aus Beobachtungen der Rotations- und Vibrationsübergänge von CO, CO₂, C₂H₂, HCN und seit Kurzem Wasser und OH ableiten und lässt vermuten, dass hier eine komplexe, von endothermen Reaktionen angetriebene Chemie abläuft (Brittain et al. 2003, Lahuis et al. 2006, Eisner 2007, Salyk et al. 2008). Mit zunehmender Entfernung zum Stern wird die Scheibe kälter und die meisten Moleküle kleben an Staubkörnern und frieren in Eismänteln aus. Der Hauptbestandteil dieser Ummantelung ist Wasser, mit Spuren anderer flüchtiger Stoffe wie CO, CO₂, NH₃, CH₄, H₂CO, HCOOH und CH₃OH_s (Zasowski et al. 2007). Typische relative Häufigkeiten dieser geringeren Bestandteile liegen bei 0.5 bis 10 Prozent der Häufigkeit von Wasser.

Abb. III.3.2: Links – Die beobachtete integrierte Intensitätskarte des H₂CO (3–2) in der DM-Tauri-Scheibe zeigt eine asymmetrische und hüllenähnliche Verteilung mit einem chemischen inneren »Loch« mit einem Radius von 100 AE. **Rechts** – Die gleichen Eigenschaften erscheinen in der synthetischen Karte der integrierten Intensität des Para-H₂CO (4–3), das mit einem realistischen physikalischen und chemischen Scheibenmodell und dem Strahlentransport in den Linien erzeugt wird.



Chemische Struktur der Scheibe

Die chemische Entwicklung protoplanetarer Scheiben wurde anhand robuster chemischer Modelle eingehend untersucht (Willacy et al. 1998, Aikawa & Herbst 1999, Willacy & Langer 2000, Aikawa et al. 2002, Bergin et al. 2003, van Zadelhoff et al. 2003, Ilgner et al. 2004, Semenov et al. 2004, Willacy et al. 2006, Ilgner & Nelson 2008). Das heutige, auf einem stabilen Zustand der Scheibenstruktur basierende theoretische Bild teilt die Scheibe in drei Zonen ein (siehe Abb. III.3.1). Bevor sich Planeten gebildet haben und das Scheibengas verflüchtigt ist, wird die dichte Mittelebene gut gegen die energiereiche stellare und interstellare Strahlung abgeschirmt. Während der innere Teil durch Akkretion aufgeheizt werden kann, ist die äußere Zone mit einer Temperatur von ca. 10 bis 20 Kelvin kalt. Die einzigen Ionisationsquellen sind Teilchen der kosmischen Strahlung und der Zerfall kurzlebiger Radionuklide, sodass die Materie bei einem geringen Maß an Turbulenz nahezu neutral bleibt. Die molekulare Komplexität in der Mittelebene wird durch Ionenmolekül- und Oberflächenreaktionen bestimmt, wobei die meisten Moleküle auf den Körnern sitzen. Neben der Mittelebene befindet sich eine wärmere Zone, die teilweise gegen die stellare und interstellare UV- und Röntgenstrahlung abgeschirmt ist. Der komplexe Wechsel zwischen mit hoher Effizienz gebildeten Molekülen in der Gasphase, Akkretion auf Stauboberflächen, schnellen Oberflächenreaktionen und nicht zu vernachlässigender Desorption führt zu einer reichhaltigen Chemie (siehe Bergin et al. 2007). Der innere Teil (10 bis 20 AE) dieser Region in den Scheiben um T-Tauri-Sterne kann durch stellare Röntgenstrahlung erheblich ionisiert werden. Die molekulare Zwischenschicht weist eine ausreichende Dichte aus (ca. 10^5 bis 10^6 cm^{-3}), um die meisten der beobachteten Emissionslinien anzuregen. Darüber befindet sich eine heiße und erheblich bestrahlte Oberflächenschicht, in der C⁺, leichte Kohlenwasser-



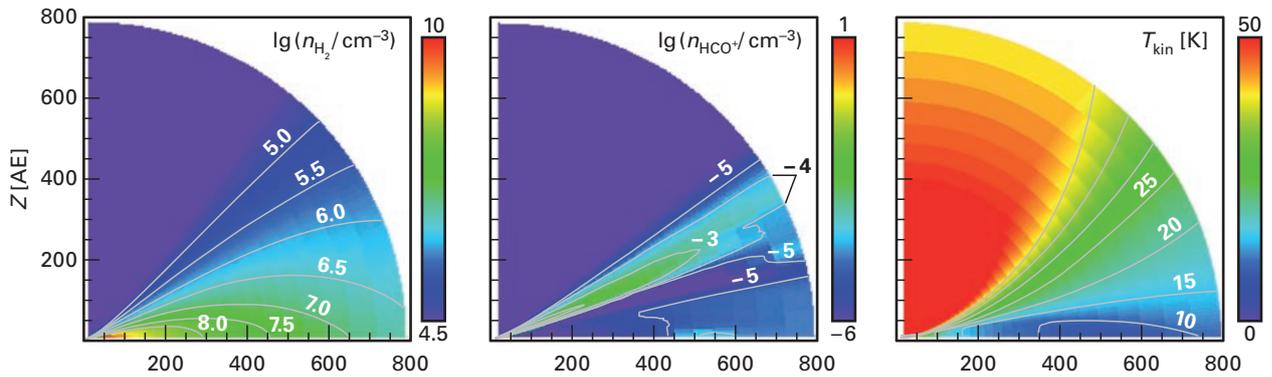


Abb. III.3.3: Verteilung von Moleküldichten und Temperatur im Scheibenmodell für DM Tau.

stoffe, deren Ionen und andere Radikale wie C_2H und CN überleben können. Dies ist die Region, in der PAH- und Silikat-Emissionsbanden erzeugt werden.

Simulation der chemischen Entwicklung von Scheiben

Das auf dem Plateau de Bure gewonnene interferometrische Bild der Scheibe um DM Tauri mit einer Auflösung von $1''.5$ in der $H_2CO(3-2)$ -Linie ist in Abb. III.3.2 (links) dargestellt. Trotz des starken Rauschens erscheint die H_2CO -Emission als asymmetrische ringähnliche Struktur mit einer Ausdünnung in südlicher Richtung. Um diese Daten richtig zu analysieren, wird eine konsistente Kombination aus physischen und chemischen Scheibenmodellen sowie des Strahlungstransports in den Moleküllinien verwendet. Um die physikalische Struktur der Scheibe zu simulieren, verwenden die Astronomen des MPIA ein aufgeweitetes 1+1D-Scheibenmodell, das dem Modell von D'Alessio et al. (1999) mit einem vertikalen Temperaturgradienten entspricht. Die Staubkörner werden als kompakte amorphe Silikatkugeln mit einem einheitlichen Radius von $0.1 \mu m$ und den Opazitätsdaten aus Semenov et al. (2003) und einem Staub/Gas-Massenverhältnis von 100 simuliert. Die angenommene Akkretionsrate beträgt $2 \times 10^{-9} M_{\odot} a^{-1}$, $\alpha = 0.01$ und der Radius der Außenscheibe 800 AE. Wir konzentrieren uns auf die beobachtbare Scheibenstruktur außerhalb eines Radius von ca. 10 AE. Die gesamte Scheibenmasse beträgt $0.07 M_{\odot}$ und ihr Alter 5 Millionen Jahre (Piétu et al. 2007). Die thermische und Dichtestruktur der Scheibe ist in Abb. III.3.3 dargestellt. Um den Fall eines schwachen oder fehlenden vertikalen Temperaturgradienten zu simulieren, betrachten wir dasselbe Scheibenmodell auch bei einer konstanten Temperatur, die dem Wert bei einer Skalenhöhe entspricht.

Die Astronomen des MPIA haben angenommen, dass die Scheibe durch die UV-Strahlung des zentralen Sterns mit einer Intensität $x = 410 x_0$ bei 100 AE und durch die interstellare UV-Strahlung mit einer In-

tensität x_0 in planparalleler Geometrie beleuchtet wird (Draine 1978, van Dishoeck et al. 2006, Dutrey et al. 2007 b). Sie simulieren die Dämpfung der kosmischen Strahlung gemäß der Gleichung (3) von Semenov et al. (2004) mit einem Anfangswert der Ionisationsrate von $\zeta_{CRP} = 1.3 \times 10^{-17} s^{-1}$. In der Scheibe wird eine innere Ionisierung aufgrund des Zerfalls kurzlebiger Radionuklide bei Annahme einer Ionisationsrate von $6.5 \times 10^{-19} s^{-1}$ (Finocchi und Gail 1997) berücksichtigt. Die Ionisationsrate durch Röntgenstrahlung in einer vorgegebenen Scheibenregion wird entsprechend den Ergebnissen von Glassgold et al. (1997 a), und Glassgold et al. (1997 b) mit Parametern für den Fall starker Metall-Unterhäufigkeit und einer gesamten Röntgenleuchtkraft von $\approx 10^{23} J cm^{-2} s^{-1}$ (Glassgold et al. 2005) berechnet. Die Gasphasen-Reaktionsraten werden aus der Datenbank RATE 06 entnommen (Woodall et al. 2007), während die Oberflächenreaktionen sowie die Desorptionsenergien aus dem Modell von Garrod und Herbst (2006) übernommen wurden. Es wurde eine Standardraten-Methode für die Simulation der Oberflächenchemie – jedoch ohne H- und H_2 -Tunneln – verwendet (Katz et al. 1999).

Mit Hilfe des zeitabhängigen chemischen Codes »ALCHEMIC« simulierten die Astronomen die Entwicklung der Scheibe um DM Tauri über 5 Millionen Jahre, gefolgt von einer 2D-Simulation des Strahlentransports ohne LTE-Linie mit »URANIA« (Pavlyuchenkov et al. 2007), (siehe Abb. III.3.4). Der beobachtete Ring der H_2CO -Emission mit einer Absenkung wird vollständig durch unser Modell reproduziert. Sie haben zwei mögliche Erklärungen für die Existenz eines derart großen chemischen Lochs in der Scheibe um DM Tauri gefunden. Das Loch mit einer Größe von 100 AE in der H_2CO -Emission wird vollständig durch ein Scheibenmodell mit durch Röntgenstrahlen getriebenen chemischen Prozessen und etwas weniger deutlich mit einem Modell ohne Oberflächenchemie reproduziert. Diese beiden Modelle prognostizieren unterschiedliche räumliche Verteilungen der molekularen Spezies, die durch zukünftige interferometrische Beobachtungen geprüft werden können.

Die Zerstörung des Formaldehyds hat wichtige Konsequenzen für die organische Chemie. Das chemische Röntgenstrahlenmodell führt zu einem inneren Loch mit einem Radius von ca. 100AE in allen chemisch verwand-

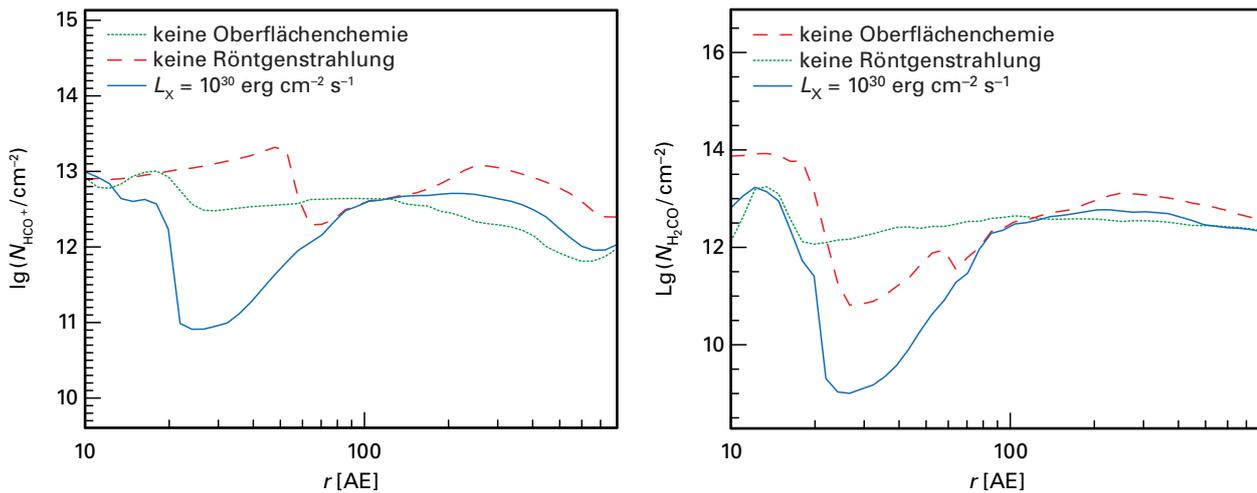


Abb. III.3.4: Links – die kreisförmige Verteilung der HCO^+ -Säulendichte in der Scheibe von DM Tauri, mit drei unterschiedlichen chemischen Modellen berechnet: 1) Es wird angenommen, dass die stellare Röntgenleuchtkraft etwa dem beobachteten Wert von 10^{23} W (durchgehende Linie) entspricht,

2) dass keine Röntgenstrahlung in die innere Scheibe gelangt (gepunktete Linie), und 3) das Modell berücksichtigt keine Oberflächenreaktionen aber Röntgenstrahlung (gestrichelte Linie). Rechts: Dieselben Berechnungen, jedoch für das chemisch verwandte H_2CO -Molekül.

ten CO-haltigen Spezies, einschließlich HCO^+ , durch die Umwandlung von CO aus der Gasphase in schwerere CO_2 -haltige und kettenähnliche Kohlenwasserstoff-Moleküle. Im Gegensatz zu CO sind diese schwereren Spezies an die Stauboberflächen in der inneren Scheibenregion gebunden, wo die Temperaturen unterhalb von ca. 35 bis 50 K liegen (Abb. III.3.4, durchgehende Linie). Dies impliziert wesentlich andere Anfangsbedingungen in Bezug auf die Anwesenheit komplexer organischer Moleküle in der planetenbildenden Zone protoplanetarer Scheiben, wenn diese von Röntgenstrahlen induzierte Chemie von Bedeutung ist.

Das weniger realistische Modell ohne Oberflächenchemie zeigt die innere Absenkung der Säulendichte nur bei hochgesättigten Molekülen wie H_2O , NH_3 und in gewissem Maße auch H_2CO (siehe Abb. III.3.4, gestrichelte Linie). Diese Spezies bilden sich auf den Oberflächen von Staubteilchen in einer Wasserstoffadditionsreaktions-Sequenz. Auch wenn wir derzeit nicht wirklich zwischen diesen beiden Szenarien unterscheiden können, ist es für unser Verständnis der Entwicklung organischer Spezies in protoplanetaren Scheiben von großer Bedeutung zu prüfen, welche dieser Erklärungen gilt. Mit Hilfe der hohen räumlichen Auflösung und Lichtstärke von ALMA hoffen wir, eine deutliche Antwort auf diese Frage zu erhalten.

Prognosen für ALMA

Obwohl in den vorherigen Abschnitten die Entwicklung komplexer chemischer Spezies in protoplanetaren Scheiben behandelt wurde, für deren vollständige Erforschung ALMA benötigt wird, muss zunächst geklärt werden, ob AL-

MA helfen wird, zwischen chemischen Schichtungen und Wärmegradienten in Scheiben zu unterscheiden. Hierzu verwenden die Astronomen des MPIA HCO^+ als repräsentatives, häufiges Molekül, das den ionisierten Anteil sichtbar macht und starke Rotationsübergänge aufweist, und das häufig in Scheiben beobachtet wird (Dutrey et al. 2007). Die HCO^+ -Häufigkeiten haben eine geschichtete Struktur, bei der die maximale HCO^+ -Konzentration von $\sim 10^{-8}$ in mittleren Höhen der Scheibe erreicht wird. Viele beobachtete Spezies haben eine ähnliche Schichtung, z.B. CO, CS, HCN etc. (Aikawa und Herbst 1999; Vasyunin et al. 2007).

Starke turbulente Mischung bzw. globale advective Strömungen können diese Häufigkeitsgradienten glätten und führen so zu gleichmäßiger verteilten Häufigkeiten (Willacy et al. 2006; Semenov et al. 2006). Aus diesem Grund wird auch ein Modell mit einer einheitlichen HCO^+ -Häufigkeit von 10^{-9} relativ zu H_2 berücksichtigt. Die ALMA-Studie basiert daher auf drei Scheibenmodellen: (1) dem Modell mit chemischer Schichtung und vertikalem Temperaturgradienten, (2) dem gleichen Modell, jedoch mit einheitlichen Häufigkeiten, und (3) dem Modell mit einheitlichen Häufigkeiten und ohne vertikalen Temperaturgradienten.

Mit Hilfe dieser drei DM-Tauri-ähnlichen Scheibenmodelle und dem 2D-Strahlungstransport-Code ohne LTE-Linie von Pavlyuchenkov et al. (2007) einschließlich des thermischen Staubkontinuums werden »ideale« (nicht mit der Auflösung des Interferometers geglättete) Karten bei den einzelnen Wellenlängen dargestellt. Bei einer Neigung von 60° beträgt die integrierte $\text{HCO}^+(4-3)$ -Linienbreite ca. 3 km s^{-1} , wobei die Intensitätsspitze bei ca. 0.8 km s^{-1} liegt. Der entsprechende 0.1 km s^{-1} breite Geschwindigkeitskanal

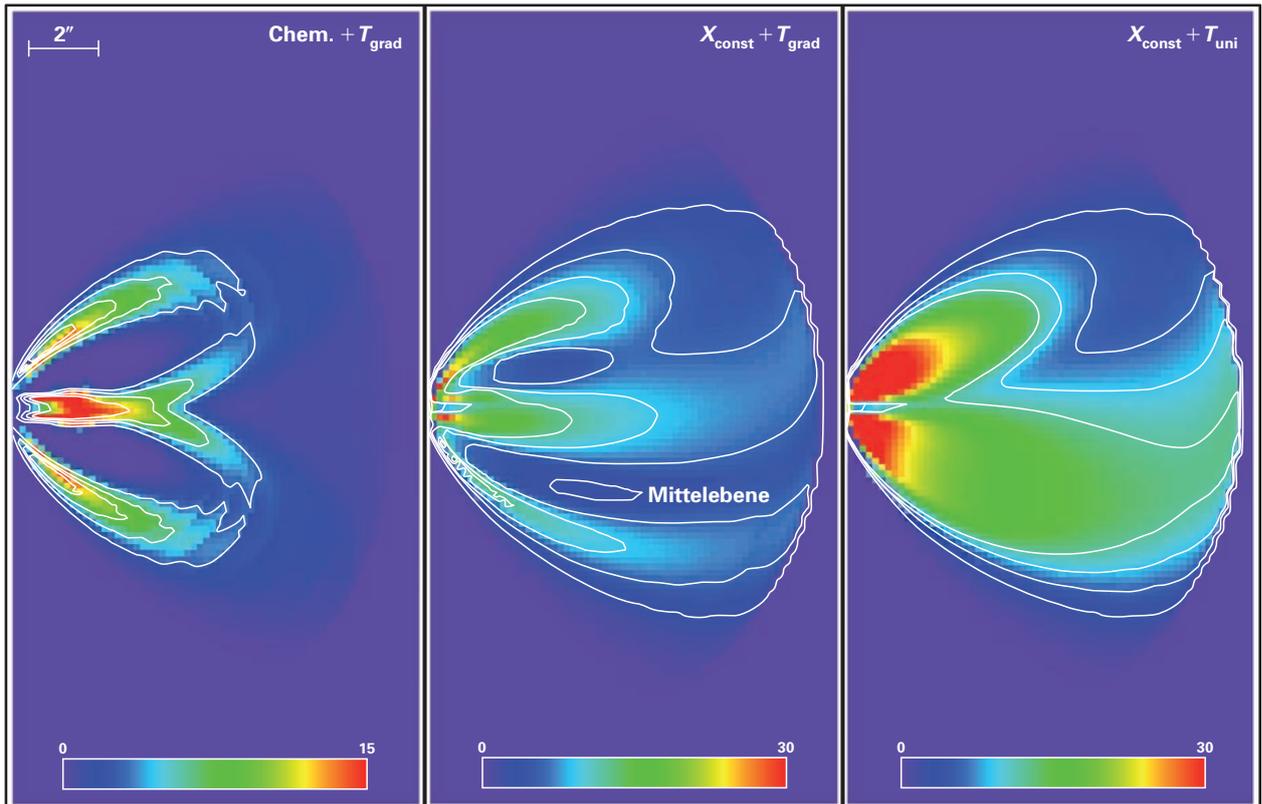


Abb. III.3.5: (von links nach rechts): Die synthetische $\text{HCO}^+(4-3)$ -Karte im Geschwindigkeitskanal $V = +0.77 \text{ km s}^{-1}$ für die drei Scheibenmodelle nach Subtraktion des Kontinuums: Das Modell mit chemischer Schichtung und Temperaturgradienten,

das gleiche Modell mit einheitlichen Häufigkeiten, mit und ohne vertikalen Temperaturgradienten. Der Neigungswinkel beträgt 60° . Die Maßeinheit der Intensität ist die Strahlungstemperatur (Kelvin).

bei $V = 0.77 \text{ km s}^{-1}$ der kontinuum-subtrahierten $\text{HCO}^+(4-3)$ -Karte ist in Abb. III.3.5 dargestellt.

Diese Ausrichtung nahezu edge-on ist besonders vorteilhaft, da die geschichteten und die einheitlichen chemischen Strukturen der Scheibe in den Karten der einzelnen Kanäle klar unterschieden werden können, wenn ausreichend kleine Kanalbreiten von $0.1\text{--}0.2 \text{ km s}^{-1}$ verwendet werden. Alle synthetischen Karten in den einzelnen Kanälen weisen ein komplexes Muster auf und sind asymmetrisch. Das Modell mit Temperatur- und Häufigkeitsgradient (links) weist eine bemerkenswerte »Omega«-förmige Struktur auf, bei der die kalte Mittlebene mit geringer HCO^+ -Konzentration als zwei »Intensitätslöcher« erscheint. Ein steiler radialer Temperaturgradient zur inneren Scheibenregion hin ist deutlich sichtbar, während der vertikale Temperaturgradient aufgrund der starken chemischen Schichtung dieser Spezies nicht vollständig durch die HCO^+ -Linien verfolgt werden kann. Die $\text{HCO}^+(4-3)$ -Emission ist thermalisiert und in diesem Fall optisch dünn.

Die beiden Modelle mit einheitlichen Häufigkeiten haben relativ hohe HCO^+ -Säulendichten, sodass die Selbstabsorption bedeutend wird. In dem Modell mit konstantem vertikalem Temperaturverlauf führt dieser

Effekt zu einer Schicht mit einer geringen Intensität im oberen Teil der Karte (Abb. III.3.5, rechts). Die gesamte Intensität der $\text{HCO}^+(4-3)$ -Emission ist jedoch höher als bei dem Modell mit geschichteten Häufigkeiten. Der radiale Temperaturgradient ist in diesem Fall ebenfalls auffällig.

Das Modell ohne chemische Schichtung und mit vertikaalem Temperaturgradienten weist ebenfalls eine Selbstabsorptionsschicht im oberen Teil der Karte auf. Die Anregungstemperatur des $\text{HCO}^+(4-3)$ -Übergangs ändert sich erheblich mit der Scheibenhöhe und hat den niedrigsten Wert in der Mittlebene. Diese Zone mit geringer Intensität erscheint als falscher »Spiralarm« im unteren Teil der Karte (gekennzeichnet als »Mittlebene« in Abb. III.3.5, mittleres Bild). Man beachte, dass dieses Muster ein wenig der »Omega«-Struktur des Modells mit der chemischen Schichtung des HCO^+ ähnelt. Hier wird nur ein repräsentativer Kanal gezeigt. Die Analyse der interferometrischen Daten ist zuverlässiger, wenn alle Kanäle und die Kontinuumsemission des Staubes berücksichtigt werden.

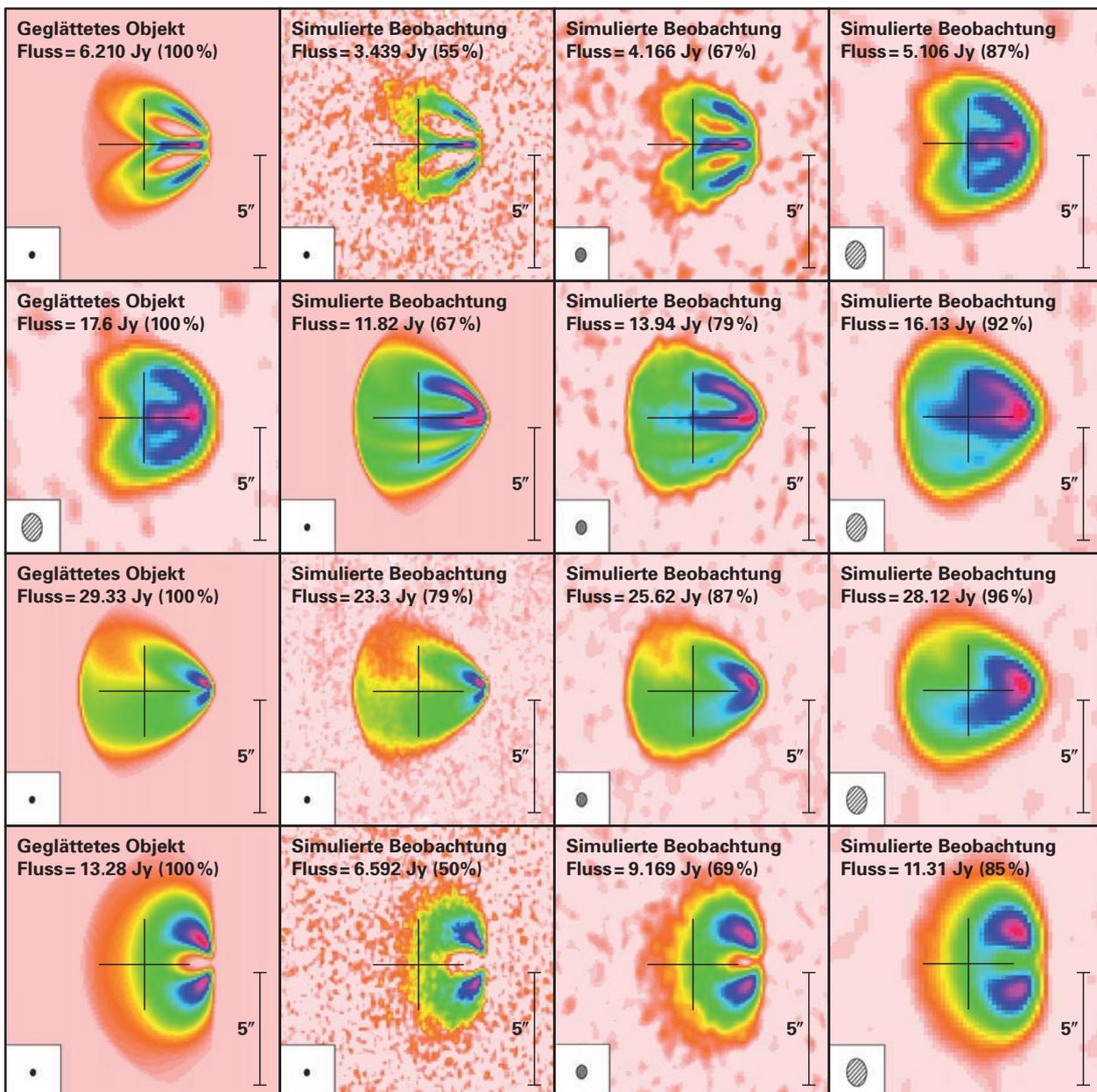
Obwohl alle berücksichtigten Modelle in den synthetischen Karten unterschieden werden können, ist es wichtig, zu untersuchen, ob ALMA in der Lage ist, die Aus-

wirkungen der thermischen und der chemischen Struktur der Scheiben voneinander zu trennen. Zur Simulation der Beobachtungen mit ALMA werden synthetische HCO^+ (4–3)-Karten bei einzelnen Geschwindigkeiten als Eingabe in die GILDAS-Simulations-Software benutzt. Die Astronomen konzentrieren sich hier auf den 0.77-km-s^{-1} -Kanal (mit einer Bandbreite von 120 kHz oder einer Geschwindigkeitsbreite von 0.1 km s^{-1}). Es werden die typischen Wetterbedingungen am Chajnantor-Plateau angenommen, wobei die folgenden Hauptfehlerarten zu

Störungen führen: 1) Die Empfängertemperatur beträgt 80K, die Systemtemperatur beträgt 230 K bei 357 GHz (siehe Guilloteau 2002), 2) Zufällige Ausrichtungsfehler während der Beobachtung werden mit $0''.60$ berücksichtigt, 3) die relativen Amplitudenfehler betragen 3 Prozent mit einer Verschiebung von 6 Prozent pro Stunde, 4) das Rest-Phasenrauschen nach Kalibrierung beträgt 30° , 5) anomale Refraktion. Es wird angenommen, dass das Objekt den Meridian in der Mitte eines Beobachtungslaufs passiert. Eine Integrationszeit von 30 Mi-

Abb. III.3.6: Erste bis dritte Reihe – wie in Abb. III.3.5, jedoch bearbeitet mit dem GILDAS ALMA-Simulator für die drei Array-Konfigurationen und die 64 Antennen: »Zoom-C« (Auflösung etwa $0''.25$, zwei Stunden Integrationszeit), »Zoom-B« ($0''.5$, 0.5 Stunden Integrationszeit) und »Zoom-E« (Auflösung etwa $1''$,

0.5 Stunden Integrationszeit). Untere Reihe – die HCO^+ (4–3)-Karte im Geschwindigkeitskanal $V = +0.3\text{ km s}^{-1}$ für das Scheibenmodell mit chemischen Gradienten und einem Neigungswinkel von 20° .



nuten wird verwendet oder so erhöht, dass die entfaltete Karte dem Eingabemodell mit chemischen Gradienten entspricht. Im Gegensatz zu modernen interferometrischen Systemen kann mit ALMA eine gute UV-Abdeckung problemlos im Bruchteil einer Stunde erzielt werden.

Die simulierten ALMA Channel Maps des $\text{HCO}^+(4-3)$ mit verschiedenen räumlichen Auflösungen für die drei übernommenen Modelle und den Neigungswinkel von 60° sind in Abb. III.3.6 (obere drei Reihen) dargestellt. Alle in den idealen molekularen Emissionsspektren vorhandenen wesentlichen Eigenschaften erscheinen deutlich bei einer Auflösung von $0''.25$ (»Zoom-c« Array-Konfiguration) und einige werden auch bei halber Auflösung (»Zoom-d«-Konfiguration) noch sichtbar sein. Die Anwendung noch geringerer Auflösungen (»Zoom-e«) macht es schwer, die chemischen und thermischen Eigenschaften ohne umfangreiche Simulationen zu trennen. Das DM-Tauri-Scheibenmodell mit geschichteten HCO^+ -Häufigkeiten und der zweidimensionale Temperaturgradient weisen die geringste Linienintensität auf und benötigen daher die längste Beobachtungszeit von zwei Stunden, während für die Modelle mit einheitlichen HCO^+ -Häufigkeiten 30 Minuten oder weniger ausreichen.

Darüber hinaus führen wir eine vergleichbare Analyse für eine Face-on-Ausrichtung mit 20° Neigungswinkel durch. Bei einer solch geringen Neigung sehen Karten in einzelnen Kanälen für verschiedene Scheibenmodelle gleich aus und eine Analyse bei vielen Linien und für viele Moleküle ist unbedingt erforderlich. Der entsprechende Kanal bei $V = 0.3 \text{ km s}^{-1}$ der $\text{HCO}^+(4-3)$ -Karte wird in Abb. III.3.6 (untere Reihe) dargestellt. Diese Channel Map hat eine ringähnliche Form mit zwei Emissionsspitzen um die Mittelebene mit geringer Intensität. In

diesem Kanal ist die Intensität zweimal stärker als bei dem Scheibenmodell mit $i = 60^\circ$, sodass die erforderliche Beobachtungszeit zur Entdeckung all dieser Eigenschaften lediglich eine Stunde bei einer Auflösung von $0''.25$ und weniger als 30 Minuten bei niedrigeren Auflösungen beträgt. Alle wesentlichen Eigenschaften der Channel Map mit $i = 20^\circ$ werden sogar mit der kompakten »Zoom-e«-Konfiguration erfasst.

Angesichts der Bedeutung der Multilinen-Beobachtungen und der Fähigkeit von ALMA, gleichzeitig mehrere Übergänge verschiedener Spezies in unterschiedlichen Frequenzbändern zu beobachten, setzen wir unsere Untersuchungen für andere wichtige Moleküle, die für die Beobachtung bedeutsam sind (CS, HCN, CO-Isotope), sowie mit einer kleineren Scheibe mit einem Radius von 250 AE fort. Alle Ergebnisse sind in der Tabelle III.3.1. zusammengefasst. Die Channel Maps für andere Übergänge bei Wellenlängen im Millimeterbereich und für Moleküle in der Zwischenschicht entsprechen den Werten für HCO^+ , auch wenn diese eine wesentlich andere Intensität aufweisen. Nach Ansicht der MPIA-Astronomen lassen sich kleinere Scheiben besser mit hohen Frequenzen von 400–700 GHz mit leicht erweiterten Array-Konfigurationen, die zu kleineren Strahlgrößen als bei Millimeter-Wellenlängen führen, untersuchen, auch wenn hierfür längere Integrationszeiten benötigt werden. Die Kontamination der hochgelegenen Emissionslinien durch das optisch dicke Staubkontinuum aus den inneren Scheibenregionen und die LTE-freie Anregung können ein Problem bei der Analyse dieser Hochfrequenzdaten darstellen.

Tabelle III.3.1: Anforderungen an die Untersuchung protoplanetarer Scheiben in Moleküllinien mit ALMA, um zwischen der thermischen Struktur und der chemischen Schichtung zu unterscheiden.

Spezies	Frequenz GHz	Bandbreite kHz	$R_{\text{Scheibe}} = 800 \text{ AE}$		$R_{\text{Scheibe}} = 250 \text{ AE}$	
			$i = 20^\circ$	$i = 60^\circ$	$i = 20^\circ$	$i = 60^\circ$
$\text{HCO}^+(1-0)$	89	30	zoom-c (4h)	zoom-c (10h)	zoom a/b (> 12h)	zoom a/b (> 12h)
$\text{C}^{18}\text{O}(2-1)$	220	75	zoom-d (1h)	zoom-e (> 12h)	zoom-c (4h)	zoom-c (10h)
$^{13}\text{CO}(2-1)$	220	75	zoom-d (< 0.5h)	zoom-d (< 0.5h)	zoom-c (2h)	zoom-c (3.5h)
CS(5-4)	245	80	zoom-e (3h)	zoom-d (12h)	zoom-b (> 12h)	zoom-b (> 12h)
HCN(3-2)	266	90	zoom-e (< 0.5h)	zoom-d (1h)	zoom-c (4h)	zoom-b (> 12h)
$\text{HCO}^+(4-3)$	357	120	zoom-d (< 0.5h)	zoom-e (< 0.3h)	zoom-c (2h)	zoom-d (12h)
$\text{HCO}^+(7-6)$	624	210	zoom-e (< 0.5h)	zoom-e (1.5h)	zoom-c (12h)	zoom-d (< 12h)
$^{13}\text{CO}(6-5)$	661	220	zoom-e (< 0.5h)	zoom-e (1h)	zoom-d (1h)	zoom-c (6h)

Zusammenfassung

Es wird ein kurzer Überblick der aktuellen Fortschritte der Kenntnisse der chemischen Entwicklung in protoplanetaren Scheiben aus theoretischer und beobachteter Sicht dargestellt. Eine zunächst rätselhafte Beobachtung des inneren chemischen Lochs in der räumlichen

Verteilung der H_2CO -Emission in der Scheibe von DM Tau wird theoretisch behandelt. Es wird festgestellt, dass ein solches Loch entweder mit der Abwesenheit einer effizienten Hydrierungsreaktion auf den Stauboberflächen oder mit der effizienten Wechselwirkung der Scheibenmaterie mit stellarer Röntgenstrahlung in der inneren Scheibenregion, die in vorhergehenden Studien übersehen wurde, erklärt werden kann. Sobald das Atacama Large Millimeter Array in Betrieb genommen wird, können die planetenbildenden Zonen der Scheiben beobachtet werden und eine Überprüfung dieser Hypothese wird möglich. Das ALMA-Interferometer wird es ermöglichen, zwischen den Auswirkungen der

Temperaturgradienten und der chemischen Schichtung der Scheiben durch Moleküllinien-Beobachtungen insbesondere bei stark geneigten Objekten zu unterscheiden. Die MPIA-Astronomen haben festgestellt, dass eine leicht erweiterte Array-Konfiguration (mit Basislinien von einem Kilometer) und Integrationszeiten von 0.5 bis 10 Stunden erforderlich sein werden, um solche Beobachtungen durchzuführen. Generell führen chemodynamische Modelle der Scheiben in Kombination mit interferometrischen Beobachtungen zu einem umfassenden Verständnis der Molekülpopulation protoplanetarer Scheiben.

Dmitry Semenov und Thomas Henning

III.4 Starburst-Sternhaufen in der Milchstraße

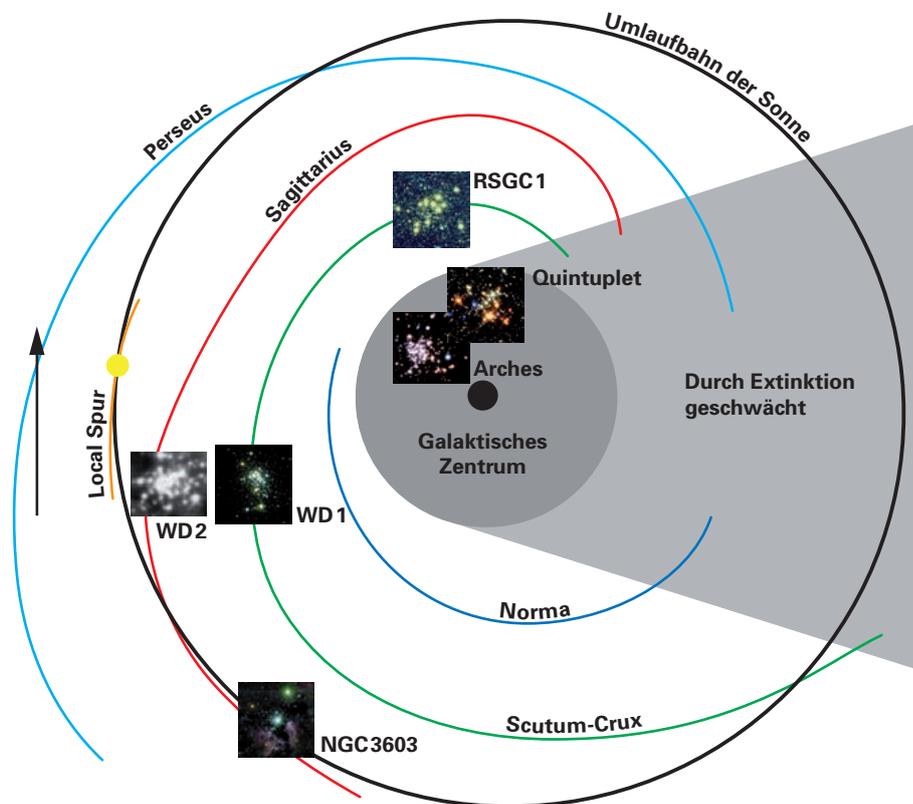
Die meisten Sterne werden nicht isoliert, sondern in Sternhaufen und -Assoziationen geboren. Wechselwirkende Galaxien wie die Antennen-Galaxie sind die Wiegen massereicher Sternhaufen mit mehreren 100 000 bis Millionen Sternen. Man geht davon aus, dass sich diese Supersternhaufen im Lauf der Zeit zu Kugelsternhaufen entwickeln, die mit jenen mehr als 150 Kugelsternhaufen, die vor 13 Milliarden Jahren das Kugelsternhaufensystem unserer Galaxis gebildet haben, vergleichbar sind. Zu den extremsten Sternentstehungsgebieten der heutigen Milchstraße zählen Starburst-Haufen mit mehreren 10 000 bis 100 000 Sternen. Da die Sternpopulation der Starburst-Haufen Sterne mit Massen von 0.1 bis 120 Sonnenmassen enthält, sind Starburst-Haufen die ideale Umgebung, um die Entstehung und frühe Entwicklung von Sternen jeder Größe zu untersuchen.

Starburst-Haufen im Alter von einigen Millionen Jahren stellen einzigartige astrophysikalische Laboratorien dar, da sie Sterne des gesamten stellaren Massenbereichs von der oberen Grenze der Massenfunktion bis zur unteren Grenze des Wasserstoffbrennens (und möglicherweise darüber hinaus), mit einheitlicher Metallizität und ein-

heitlichem Alter in einer relativ homogenen Umgebung enthalten.

Deshalb sind Starburst-Haufen der ideale Ort für die Beobachtung der Entstehung und Entwicklung von Sternen und Sternhaufen und die Überprüfung der entsprechenden Theorien. Anders als wechselwirkende Galaxien wie die Antennen-Galaxie, wo Hunderte von Supersternhaufen entdeckt wurden, beherbergt die Milchstraße nur eine Handvoll Starburst-Haufen. Die Starburst-Haufen der Antennen-Galaxie sind kaum aufgelöst, sodass wir nur die integrierten Eigenschaften Hunderttausender Sterne untersuchen können. In der Milchstraße jedoch können Starburst-Haufen in Tausende bis Zehntausende Sterne aufgelöst werden und die Eigenschaften jedes einzelnen Sterns können individuell bestimmt werden.

Abb. III.4.1: Position der derzeit bekannten galaktischen Starburst-Haufen auf einer Karte (mit freundlicher Genehmigung von Wikipedia) der galaktischen Spiralstruktur. Die Umlaufbahn der Sonne ist als schwarzer Kreis dargestellt und die aktuelle Position der Sonne ist durch einen gelben Punkt markiert. Die kleinen eingefügten Bilder zeigen Nah-Infrarot-Aufnahmen der einzelnen Starburst-Haufen.



Galaktische Starburst-Haufen

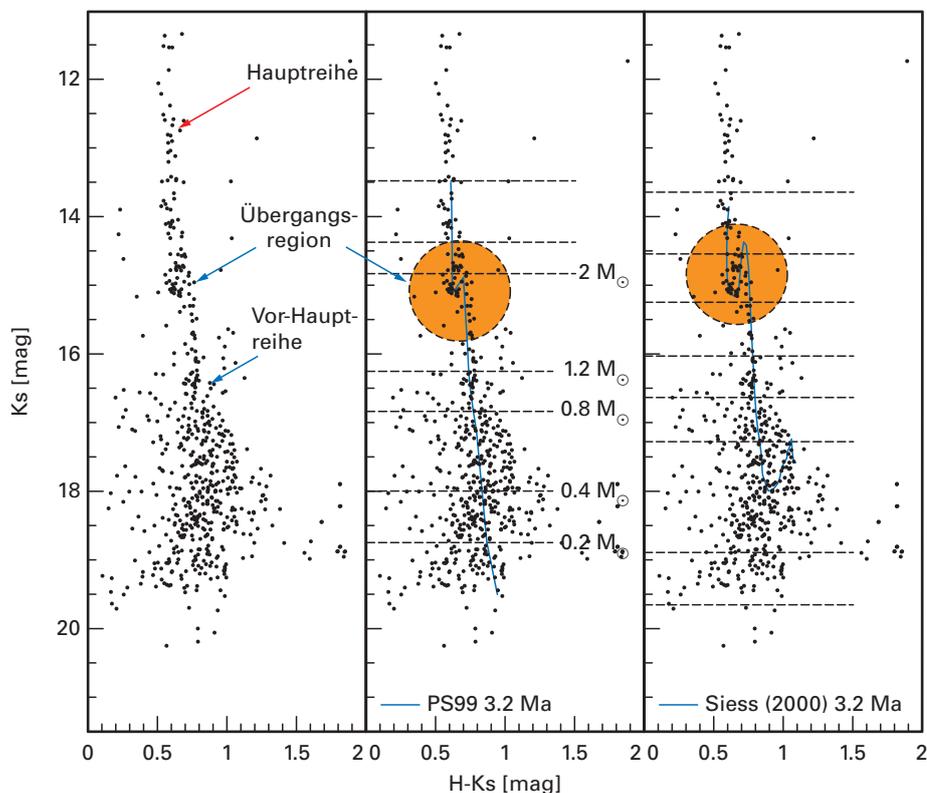
Die galaktischen Starburst-Haufen stehen entweder im Zentrum oder in den Spiralarmen des Milchstraßensystems. Angesichts der starken Absorption durch interstellaren Staub und der hohen Sterndichte in der galaktischen Ebene ist unsere Zählung der Starburst-Haufen höchstwahrscheinlich unvollständig, da alle bekannten Starburst-Haufen in dem Spiralarm auf der nahen Seite der Galaxis liegen (siehe Abb. III.4.1). Die Unvollständigkeit zeigt sich auch durch die kürzliche Entdeckung zweier eingebetteter roter Superhaufen im Scutum-Crux-Spiralarm. Diese roten Superhaufen wären vor fünf bis zehn Millionen Jahren als Starburst-Haufen qualifiziert worden.

Vorteile der Untersuchung räumlich aufgelöster Starburst-Haufen

Die Untersuchung lokaler und daher räumlich aufgelöster Starburst-Haufen bietet mehrere Vorteile. Zunächst einmal ist die große Anzahl an Sternen eine wesentliche Voraussetzung für eine statistisch fundierte Ermittlung der Massenfunktion und der dynamischen Eigenschaften der Sternhaufen. Darüber hinaus beherbergen Starburst-Haufen im Vergleich zu weniger extremen Sternbildungsumgebungen zunächst die größten und hellsten O-Sterne auf der Hauptreihe. Schnelle Sternwinde zerstreuen alle verbliebenen interstellaren

Materieüberreste der Entstehung des Sternenhaufens. UV-Photonen der größten Sterne führen zu einer schnellen Verdampfung verbliebener zirkumstellarer Materie um die massearmen Sterne des Haufens. Daraus ergeben sich zweierlei Vorteile: Die Haufenmitglieder leiden nicht oder nur geringfügig unter differenzieller Absorption und Verfärbung, was eine gut definierte Farben-Helligkeits-Sequenz für die Haufensterne ermöglicht (Abb. III.4.2). Darüber hinaus bedeutet die Abwesenheit zirkumstellarer Materie, dass für den Vergleich mit den Beobachtungen akkretionsfreie theoretische Vor-Hauptreihen-Entwicklungswege verwendet werden können. Laufende Akkretion verändert die Entwicklungswege im Vor-Hauptreihenstadium recht drastisch.

Abb. III.4.2: Farben-Helligkeits-Diagramm der zentralen Region von Westerlund I im nahen Infrarot, abgeleitet aus Beobachtungen mit der Adaptiven Optik (NACO) des ESO VLT. *Links:* Die Population der Vor-Hauptreihe und der Hauptreihe sowie die Übergangsregion zwischen den beiden sind gekennzeichnet. *Mitte:* Die am besten passende Isochrone PS99 von Palla und Stahler (1999) ist eingezeichnet. Sie beschreibt gut die Übergangsregion und ergibt den gleichen Wert für die Vordergrund-Absorption wie durch den Vergleich von Hauptreihensternen mit einer »Genfer Isochrone«. Das *rechte* Diagramm zeigt, dass eine Isochrone von Siess et al. (2000) nicht auch die Übergangsregion beschreibt. Der Versatz bei den Infrarot-Eigenfarben bei massearmen Hauptreihensternen zeigt im Vergleich mit den Genfer Isochronen ein potenzielles Problem beim Wechsel von der theoretischen auf die Beobachtungsebene für die Siess'schen Entwicklungswege.



Westerlund 1 – Test der Entwicklungswege

Die folgende Analyse basiert auf den Nah-Infrarot-Beobachtungen des Haufens Westerlund I, der sich im Scutum-Crux-Spiralarm in einer Entfernung von 3.5 kpc zur Sonne befindet. Mit einer anfänglichen Sternmasse von mehr als 50 000 Sonnenmassen ist Westerlund I einer der größten bisher in der Milchstraße entdeckten Starburst-Haufen. Die mit dem ESO NIT und SOFI erfassten Weitfelddaten umfassen einen Bereich von ca. $5 \text{ pc} \times 5 \text{ pc}$, der auf Westerlund I ausgerichtet ist. Ergänzt werden diese Daten durch mit der Adaptiven Optik NACO am ESO VLT erfasste hochauflösende Bilder des Haufenzentrums.

Starburst-Haufen gehen kaputt – oder sind es Proto-Kugelsternhaufen?

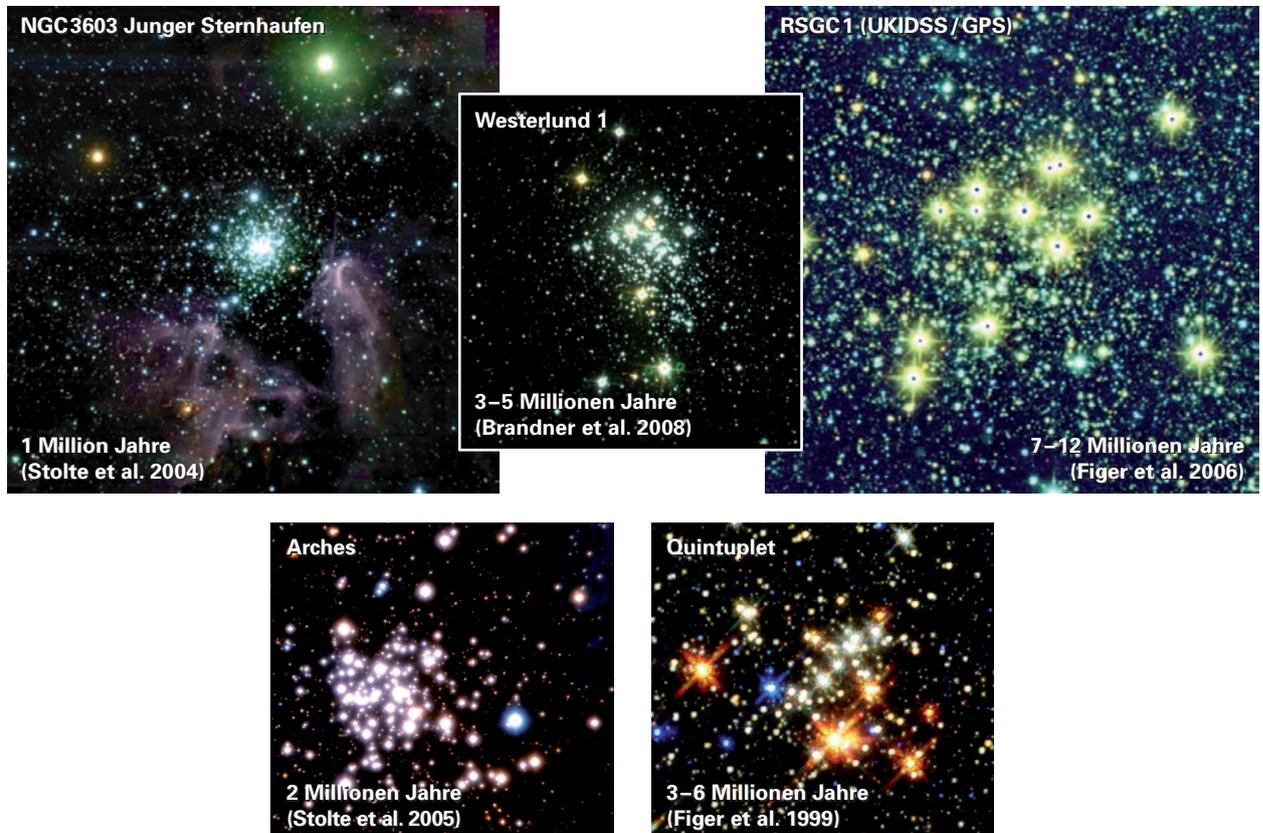
Schon seit zwanzig Jahren gibt es die Vermutung, angesichts ihrer Gesamtmasse von mindestens mehreren 10 000 Sonnenmassen müssen sich Starburst-Haufen aus gigantischen Molekülwolken gebildet haben. Sobald die größten Sterne auf der Hauptreihe erscheinen, ionisieren sie schnell die verbleibenden Gaswolken und lösen sie auf. Simulationen verschiedener Forschungsgruppen zeigen, dass eine Sternbildungseffizienz (SFE) von mindestens 30 Prozent erforderlich ist, damit die Sternenhaufen gebunden bleiben. Unter besonderen Umständen kann

jedoch eine SFE von 10 Prozent ausreichen, damit die Haufen hundert Millionen Jahre überleben können.

Um die Frage zu beantworten, ob einer der lokalen Starburst-Haufen einen Proto-Kugelsternhaufen darstellt, muss die Kinematik der Haufen beobachtet werden. Bisher wurden aus radialen Geschwindigkeitsmessungen einiger der hellsten Mitglieder der Haufen Arches und Westerlund I eindimensionale Geschwindigkeitsdispersionen ermittelt und – unter Annahme eines virialen Gleichgewichts – genutzt, um eine obere Grenze für die Gesamtmasse eines jeden der beiden Haufen zu bestimmen.

Von den in Abb. III.4.3 gezeigten, im gleichen physikalischen Maßstab dargestellten und nach Alter von links nach rechts sortierten Starburst-Haufen weisen nur NGC 3603 YC und Arches, die beiden jüngsten Haufen unserer Stichprobe, kompakte Kerne mit einem Radius von weniger als 0.5 pc auf, während die bereits ein wenig weiter entwickelten Haufen Westerlund 1 und Quintuplet einen Radius von 1 pc aufweisen. Die beiden kürzlich entdeckten roten Superriesen-Haufen mit einem Alter von ca. 10 Millionen Jahren haben einen noch größeren Radius.

Abb. III.4.3: Nah-Infrarot-Bilder galaktischer Starburst-Haufen – alle im selben physikalischen Maßstab, sortiert entsprechend ihres Alters *von links nach rechts*. Die deutliche Zunahme der Haufengröße mit zunehmendem Alter lässt eine schnelle dynamische Entwicklung der Starburst-Haufen (und ihre schnelle Auflösung im allgemeinen galaktischen Feld) vermuten.



Für die Haufen in Spiralarmen, die nur schwachen Gezeitenkraftfeldern unterliegen, könnte dies der Nachweis sein, dass die dynamische Entwicklung durch den Gasausstoß beschleunigt wird. Bei den Starburst-Haufen in der Zentralregion der Galaxis könnten starke Gezeitenkräfte zu einer schnellen Zerstreuung der Haufen führen.

Es bestehen daher keine Anzeichen, dass die aktuelle Generation der Starburst-Haufen der Milchstraße nicht langlebig ist und sich somit von Proto-Kugelsternhaufen unterscheidet.

Ausblick

Stolte et al. (2008) verglichen kürzlich zu verschiedenen Zeiten durchgeführte hochauflösende Beobachtungen von Arches mit Adaptiver Optik und leiteten eine Obergrenze für die zweidimensionale Geschwindigkeitsdispersion ab, die mit den Radialgeschwindigkeitsmessungen verträglich ist. Sie zeigen auch, dass sich aus einer astrome-

trischen Nachbeobachtung wahrscheinlich die wahre Geschwindigkeitsdispersion von Arches ermitteln lassen sollte.

Fortgesetzte astrometrische Beobachtungen der Starburst-Haufen in der Milchstraße zu verschiedenen Epochen werden daher eine erheblich verbesserte Eingrenzung der internen Geschwindigkeitsdispersion ermöglichen, die wiederum für den Vergleich mit theoretischen Modellen wertvoll ist.

Die nächste Generation hochpräziser astrometrischer Instrumente wie GRAVITY für das ESO VLT wird die Kinematik der Sterne im zentralen Bereich der Starburst-Haufen offenlegen, dynamische Massenabschätzungen für die größten Sterne liefern und möglicherweise im unmittelbaren Zentrum dieser Haufen versteckte Schwarze Löcher mittlerer Masse aufspüren.

*Wolfgang Brandner, Boyke Rochau,
Felix Hormuth,
in Zusammenarbeit mit Andrea Stolte (UCLA)*

IV. Instrumente und Projekte

IV.1 Instrumente für das LBT

LUCIFER 1 und 2: Zwei Multimode-Instrumente für das nahe Infrarot

Mitte 2008 soll das erste der beiden baugleichen Infrarotgeräte LUCIFER 1 und 2 nach Tucson an das LBT ausgeliefert werden. Die komplexen Systeme bestehen jeweils aus einer hochauflösenden Infrarotkamera, einem Langspaltspektrographen und einem Multi-Objekt-Spektrographen – sie werden die zentralen Infrarotgeräte am LBT sein.

Nach dem Zusammenbau von LUCIFER 1 am MPIA Ende 2007 wurden erste Tests des Gesamtsystems durchgeführt. Detaillierte Untersuchungen zur Abbildungsqualität, Durchbiegung, spektralen Auflösung usw. werden im Frühjahr 2008 folgen. Parallel dazu ist am MPI für extraterrestrische Physik die Einheit für die Multi-Objekt-Spektroskopie (MOS) fertiggestellt und getestet worden, Ende 2007 wurde auch sie am MPIA in LUCIFER 1 eingebaut. Im Wesentlichen besteht die MOS-Einheit aus einem kryogenen Maskenwechsler: Ein Robotersystem ermöglicht den Austausch von Langspalt- oder MOS-Masken aus einem Magazin. Die Magazine können am Tag ausgetauscht werden, ohne den Kryostaten aufzuwärmen. Das zweite LUCIFER-Instrument soll im Abstand von etwa einem Jahr folgen.

Abb. IV.1.1: Beide Einzelteleskope des LBT werden je mit einem IR-Kamera-Spektrographen ausgerüstet.

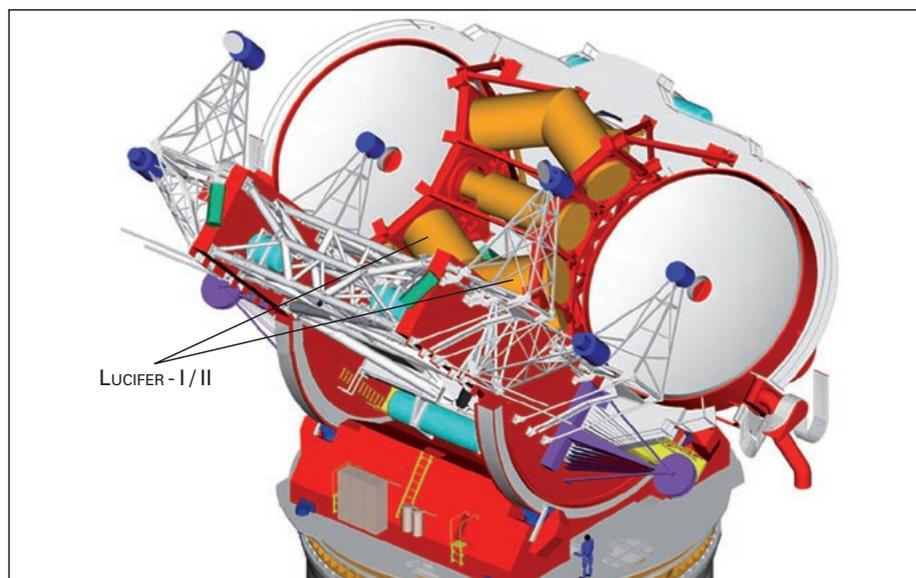
Instrumentelles Konzept

LUCIFER (LBT NIR Spectrograph Utility with Camera and Integral Field Unit for Extragalactic Research) ist ein Spektrograph mit Kamera für das LBT zum Einsatz im nahen Infrarot (Wellenlängenbereich von 0.9 bis 2.5 Mikrometer). Ein Konsortium aus fünf Instituten (Landessternwarte Heidelberg, MPIA, MPI für extraterrestrische Physik, Astronomisches Institut der Ruhr-Universität Bochum und Fachhochschule für Technik und Gestaltung Mannheim) baut dieses Instrument in zweifacher, identischer Ausführung.

LUCIFER 1 und 2 sollen die Arbeitspferde des LBT für das nahe Infrarot werden. Sie liefern direkte Infrarotbilder und Spektren sowohl mit Seeing- als auch mit beugungsbegrenzter Winkelauflösung. Einen Überblick über die verschiedenen Beobachtungsmodi geben die Tabellen IV.1.1 und IV.1.2.

Die Instrumente werden bei Temperaturen von weniger als 70 K arbeiten. Im wesentlichen stehen folgende Beobachtungsmöglichkeiten zur Verfügung:

- Seeing-begrenzte Abbildung
 - beugungsbegrenzte Abbildung mit einem Gesichtsfeld von 0.5×0.5 Quadratbogenminuten
 - Langspalt-Spektroskopie (Seeing- und beugungsbegrenzt)
 - Multi-Objekt-Spektroskopie (MOS) mit Spaltmaske
- Der Wechsel zwischen direkter Abbildung und Spektroskopie erfolgt durch Drehen der Gittereinheit (Austausch eines flachen Spiegels gegen ein Gitter) und den Wechsel



Modus	Seeing-begrenzt		beugungs- begrenzt
	N 3.75	N 1.8	
Kamera	N 3.75	N 1.8	N 30
Gesichtsfeld	4' × 4'	4' × 4'	0'5 × 0'5
f_{Coll}	1500 mm	1500 mm	1500 mm
f_{Cam}	375 mm	1800 mm	3000 mm
f_{eff}	30 940 mm	14 850 mm	247 540 mm
Skala	120 mas/pxl	250 mas/pxl	15 mas/pxl
Pupillen- durchmesser	102 mm	102 mm	102 mm
Spaltlänge	≤ 4'	≤ 4'	≤ 0'5
R_{lim}	10 000	500	
FSR (K)	0.22 μm	0.46 μm	

Tabelle IV.1.1: Instrumentelle Parameter im beugungsbegrenzten und im Seeing-begrenzten Beobachtungsmodus.

der Fokalmaske (von feldbegrenzender Maske zu Langspalt- oder Vielfachspaltmaske). Dieser Austausch der Fokalmasken erfolgt über ein kompliziertes kryogenes Robotersystem, das am MPI für extraterrestrische Physik in Garching entwickelt wurde.

Ein besonderer, in Tabelle 2 nicht aufgeführter Beobachtungsmodus ist noch in Vorbereitung: Für die Suche nach extrasolaren Planeten wird in die Filterräder ein optisches System integriert, das in Verbindung mit der $f/30$ -Kamera vier parallele Bilder mit geringfügig verschiedenen Schmalbandfiltern um die Methan-Absorption bei $1.6 \mu\text{m}$ Wellenlänge liefert. Damit können Differenzbilder erzeugt werden, die die Suche nach Planeten in unmittelbarer Nähe heller Sterne erleichtern, jedenfalls dann, wenn die Atmosphären der Planeten einen hohen Methananteil besitzen. Die hierfür benötigten optischen Komponenten werden derzeit in Zusammenarbeit mit dem Institut für angewandte Optik und Feinmechanik in Jena gebaut.

Parameter	Kamera	Spektroskopie
Skala	0'25/pxl	0'25/pxl
Gesichtsfeld	4' × 4'	3' × 4'
Auflösung	Akquisitionsmodus nur Schmalbandfilter	500 – 5000 Akquisitionsmodus gesamtes Band zJHK Langspalt und MOS
Skala	0'12/pxl	0'12/pxl
Gesichtsfeld	4' × 4'	4' × 3'
Auflösung	Breit- und Schmal- bandfilter	1000 – 10 000 Langspalt und Mos
Skala	0'015/pxl	0'015/pxl
Gesichtsfeld	0'5 × 0'5	0'5 × 0'5
Auflösung	durch Isoplanatismus begrenzt	4000 – 40 000 Langspalt

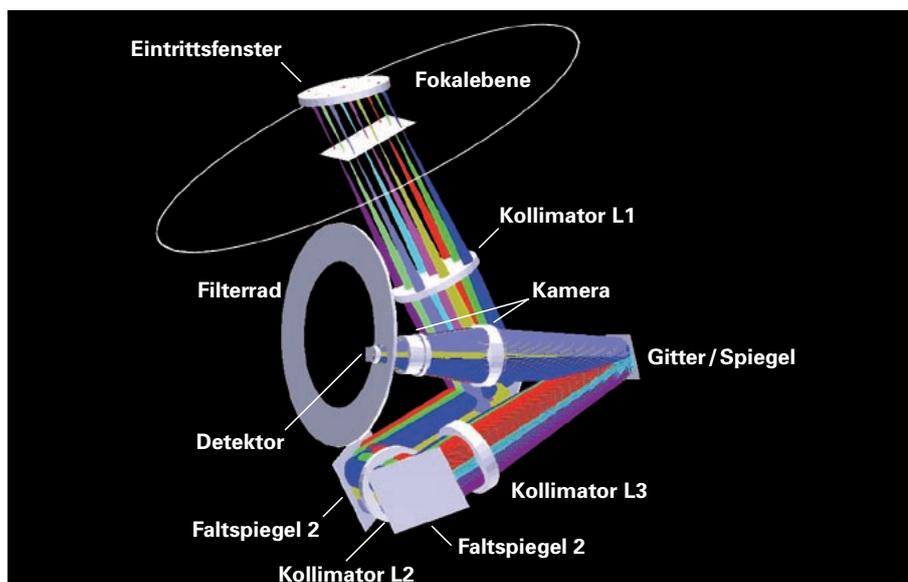
Tabelle IV.1.2: Zur Verfügung stehende Beobachtungsmodi.

Technische Details

Das optische Konzept ist in Abb. IV.1.2 dargestellt: Die Fokalebene des Teleskops liegt bereits im Kryobereich (hinter dem Eintrittsfenster), so dass hier kalte Feldbegrenzungsmasken, Langspalt- und MOS-Masken eingeschwenkt werden können. Das Eintrittsfenster selbst ist ein AR-beschichtetes Quarzfenster, das um 15 Grad gegen die optische Achse gekippt ist. Der so reflektierte optische Teil des einfallenden Lichtes wird auf den Wellenfrontsensor weitergeleitet und dient als Steuerungssignal für die adaptive Optik.

Der im Strahlengang folgende dreilinsige Kollimator ist mit Hilfe von drei ebenen Spiegeln so gefaltet, dass das Gesamtsystem möglichst wenig Raum benötigt.

Abb. IV.1.2: Das optische Konzept der Kamera und des Spektrographen.



Die Pupillenebene im kollimierten Strahlengang fällt mit der Ebene des Gitters (bzw. Faltspiegels) zusammen. Die nachfolgenden Kamerasysteme sind auf einem Rad untergebracht, es kann zwischen drei verschiedenen Abbildungsmaßstäben gewählt werden. Die beiden schnelleren Kameras sind reine Linsensysteme, die $f/30$ -Kamera ist ein Cassegrainsystem mit zweilinsigem Korrektor.

Der Detektor ist vom Typ Hawaii-II mit 2048×2048 18- μm -Pixeln. Die Fokusposition kann im Betrieb korrigiert werden. Mit den Öffnungsverhältnissen von 1.8, 3.75 und 30 beträgt die Abbildungsskala 0.25, 0.12 und 0.015 Bogensekunden pro Pixel.

Auf zwei Filterrädern haben 28 Filter Platz. Die Filterräder befinden sich im konvergenten Strahlengang vor dem Detektor (siehe Abb. IV.1.2). Gegenwärtig sind für beide LUCIFER-Instrumente je acht Schmalband- und zehn Breitbandfilter vorgesehen.

Die Kalibrationseinheit

Zu Kalibrationszwecken kann vor das Kryostatfenster eine Einheit geschwenkt werden, die das Licht ei-

ner Kalibrationslampe, das aus einer Ulbrichtkugel austritt, auf die Pupillenebene von LUCIFER abbildet. Hier steht sowohl eine Breitbandlampe zur Eichung der Kamera, als auch ein Gasentladungslampe für die Wellenlängeneichung zur Verfügung.

Der Kryostat

Die gesamte Optik einschließlich der Fokalebene des Teleskops ist im Kryostaten auf etwa 70 K abgekühlt. Das Gehäuse des Kryostaten ist eine leichtgewichtige Edelstahlkonstruktion (siehe Abb. IV.1.3). Alle Versorgungsdurchbrüche wie Steckerflansche, CCC-Kühler, Vakuumanschlüsse und Zu- und Abfluss des flüssigen Stickstoffs sind auf dem unteren (bzw. vorderen) Kryostatenteil untergebracht (Abb. IV.1.4).

LUCIFER wird mit zwei Gifford-McMahon-Kühlern (Sumitomo) auf einer Temperatur von etwa 70 K gehalten. Zur Beschleunigung des Abkühlvorgangs kann über ein Rohrsystem mit Wärmetauschern flüssiger Stickstoff eingeleitet werden. Der Detektor ist an das selbe Kühlsystem angeschlossen und kann über einen Temperaturregler mit einer Genauigkeit von ± 0.01 K auf seiner Arbeitstemperatur zwischen 72 K und 80 K stabilisiert werden. Die beiden CCC-Kühler stehen sich am Kryostaten diametral gegenüber, sie sind synchronisiert, indem das Heliumdrucksignal des ersten Kühlers zur Taktung des zweiten benutzt wird. Auf diese Weise werden Vibrationen, die möglicherweise trotz der ge-

Abb. IV.1.3: LUCIFER 1 in der Experimentierhalle des MPIA während der Integrationsphase: Der obere Kryostatenteil wird gerade abgehoben, innen wird die mit Superisolationsfolie umgebene kalte Struktur sichtbar. Im Hintergrund der Teleskopsimulator.



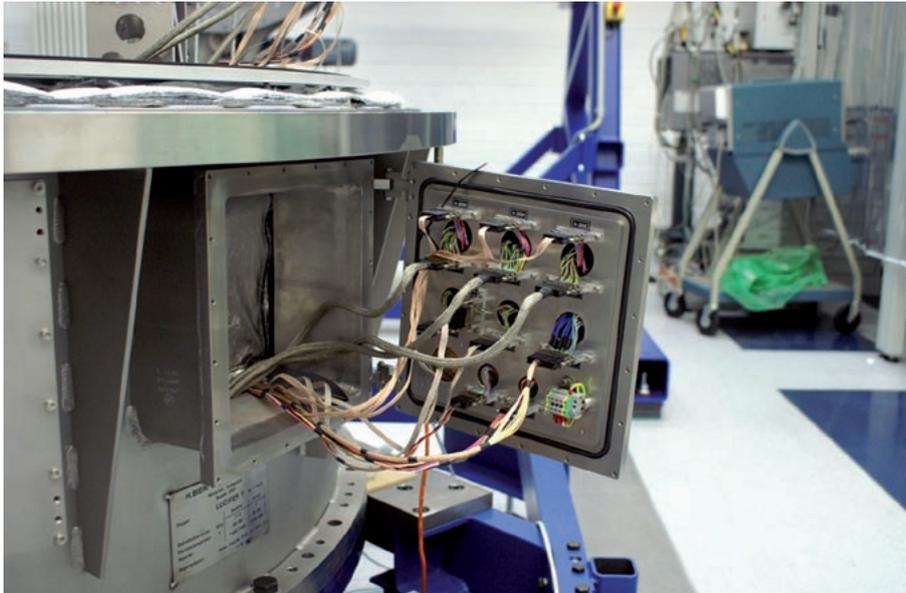


Abb. IV.1.4: Der Flansch für die Kabeldurchführungen ist geöffnet und gibt den Blick auf die Kabelführung im Kryostaten frei.

dämpften Halterung der Kühlköpfe auf den Vakuumtank übertragen werden, weiter minimiert. Dies ist für den interferometrischen Betrieb des Teleskops von besonderer Bedeutung.

Der zylindrische Vakuumtank hat einen Durchmesser von etwa 1.6 m und eine Gesamtlänge von etwa der gleichen Größe. Das vollständig integrierte Instrument wiegt 2600 kg, davon werden etwa 400 kg auf die Arbeitstemperatur von 60 K bis 100 K abgekühlt. Auf der Rückseite des Kryostaten (in Abb. IV.1.3 dem Beobachter zugewandt) befindet sich der Flansch zum Magazinwechsel. Er ist mit einem großen Vakuumventil versehen, so dass nach Anflanschen und Abpumpen eines Hilfskryostaten das Maskenmagazin herausgezogen und ausgetauscht werden kann.

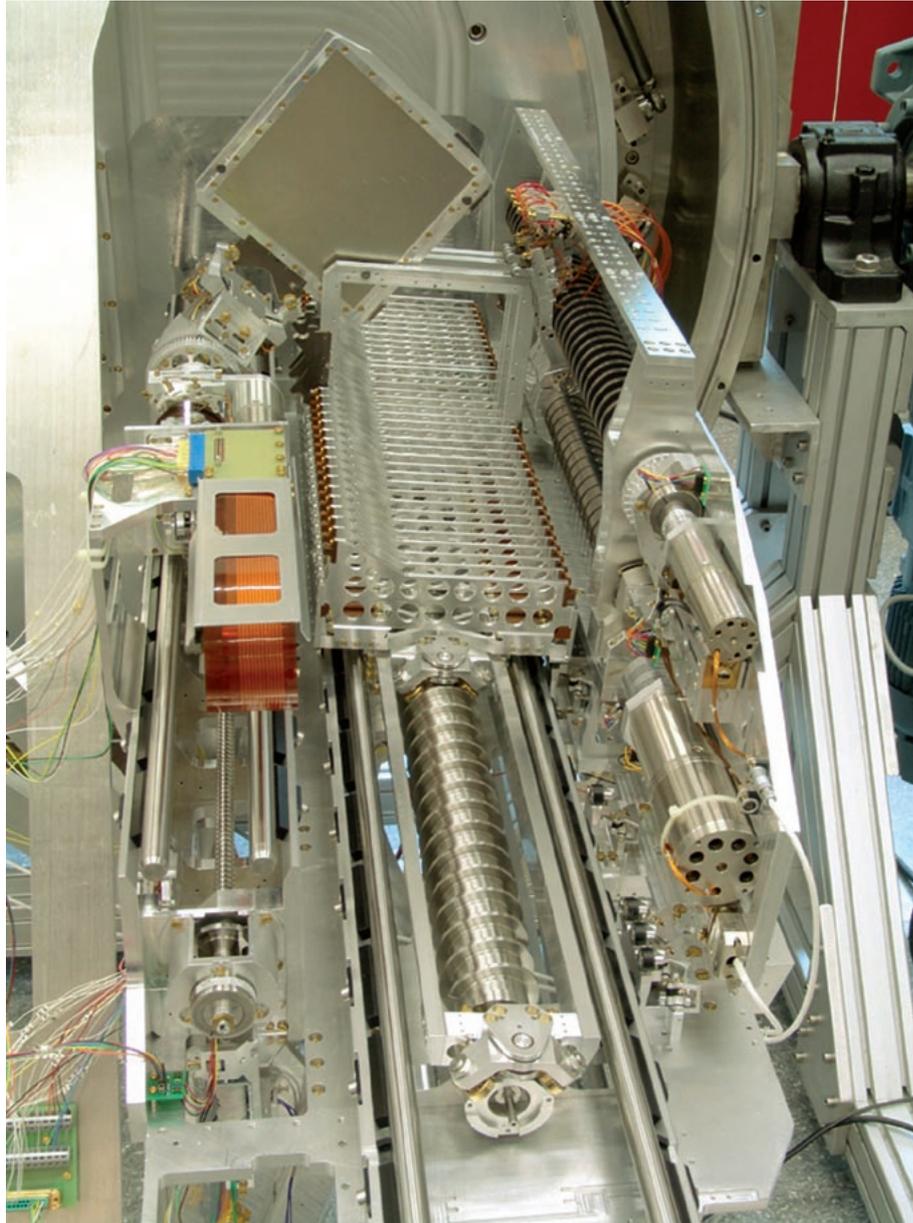
Neben der MOS-Einheit, die weiter unten etwas ausführlicher beschrieben wird, werden in LUCIFER acht Motoreinheiten sämtlich mit kryogenen Steppermotoren angetrieben:

- Zwei der drei Faltspiegel können ferngesteuert in zwei Richtungen verkippt werden, womit zum einen eine Feinjustage im Kalten geschieht. Zum anderen kann dieser Mechanismus zur Kompensation von restlichen Durchbiegeeffekten genutzt werden.
- Zwei Gitter und ein ebener Spiegel sind auf der Gitterwechseleinheit untergebracht, der Antrieb dient zum Gitterwechsel bzw. zum Wechsel zwischen Kameramodus und Spektroskopie sowie andererseits zum Einstellen der zentralen Wellenlänge.

- Die beiden Filtrerräder bieten Raum für 28 Filter, derzeit sind 18 Positionen mit Filtern belegt. Je eine weitere Position ist reserviert für die differenzielle Kamera.
- Vor dem Kamerarad kann eine zusätzliche Linse eingeschwenkt werden, die zusammen mit der $f/1.8$ -Kamera die Pupille auf den Detektor abbildet. Hiermit kann die Ausrichtung von Teleskop und Instrument kontrolliert werden.
- Der Kamerarevolver beherbergt die drei Kamerasysteme $f/1.8$, $f/3.75$ und $f/30$. Alle drei können sowohl als Imager als auch als Spektrographen eingesetzt werden. Die $f/30$ -Kamera kann auch als differenzielle Methanbanden-Kamera benutzt werden, die $f/1.8$ -Kamera dient zusammen mit einer Vorlinse auch zur Pupillenabbildung.
- Durch eine Korrektur der Fokuseinstellung um bis zu ± 5 mm können Unterschiede in der optischen Filterdicke ausgeglichen werden.

Der Maskenaustauschmechanismus

Die Multiobjektspektroskopie wird für LUCIFER wohl der am häufigsten benutzte Modus sein. Beide LUCIFER-Geräte sind mit Wechselmagazinen für die Spaltmasken ausgerüstet. Zehn Langspalt- und Feldmasken stehen als Standardausrüstung zur Verfügung. Zusätzlich können mit Hilfe eines kryogenen Roboters 23 Vielfachspaltmasken (MOS-Masken) ausgetauscht werden. Der Roboter führt die aktuelle Fokalmaske an ihren Stammpfad im Magazin zurück, sucht sich die angewählte Maske im Magazin und bringt sie in die Fokalebene. Die Magazine mit den 23 MOS-Masken können wie oben beschrieben am Tag ausgewechselt werden. Der aufwendige Magazinwechsel bei tiefer Temperatur (Abb. IV.1.5) verbessert die Beobachtungsbereitschaft von LUCIFER wesentlich: Zwar



wird der Magazinwechsel am Tag ausgeführt und wahrscheinlich nicht öfter als zweimal pro Woche, aber ein Aufwärmzyklus dauert bei LUCIFER sechs Tage, während derer das Instrument nicht einsatzbereit wäre.

Die erste MOS-Einheit ist bereits fertiggestellt und wurde im Normalbetrieb erfolgreich getestet. Die zweite Einheit wird gegenwärtig am MPE zusammengebaut, sie soll im Januar 2008 an das MPIA geliefert werden.

Auslese- und Kontrollelektronik

Die Kontrollelektronik des Instruments umfasst folgende Komponenten, die in einem temperaturgeregelten Rack untergebracht sind: Spannungsversorgung, Überspannungsschutz und Gerätesicherung; Temperaturregelung des Racks und des Detektors; Motorkontrollelektronik;

Abb. IV.1.5: Blick auf die MOS-Einheit mit Magazin und Roboter. Eine Maske wird gerade ausgetauscht.

Instrument-Kommunikationseinheit. Das Rack mit der Kontrollelektronik soll fest am Teleskop aufgestellt werden, es ist über den Kabeltwister mit dem Instrument verbunden. Die Ausleseelektronik und die MOS-Kontrollelektronik sitzen Huckepack auf der Rückseite des Kryostaten. 32 Kanäle werden zusammen mit den vier zusätzlichen Referenzkanälen parallel ausgelesen. Untersuchungen des Ausleserausens ergaben etwa 1 ADU pro Auslesung, was etwa einem Drittel des Detektor-Ausleserausens entspricht. Insgesamt werden drei Auslese-Elektroniksysteme gebaut und geliefert, je eine für jeden der beiden LUCIFER, und eine zusätzliche als Reserveteil.

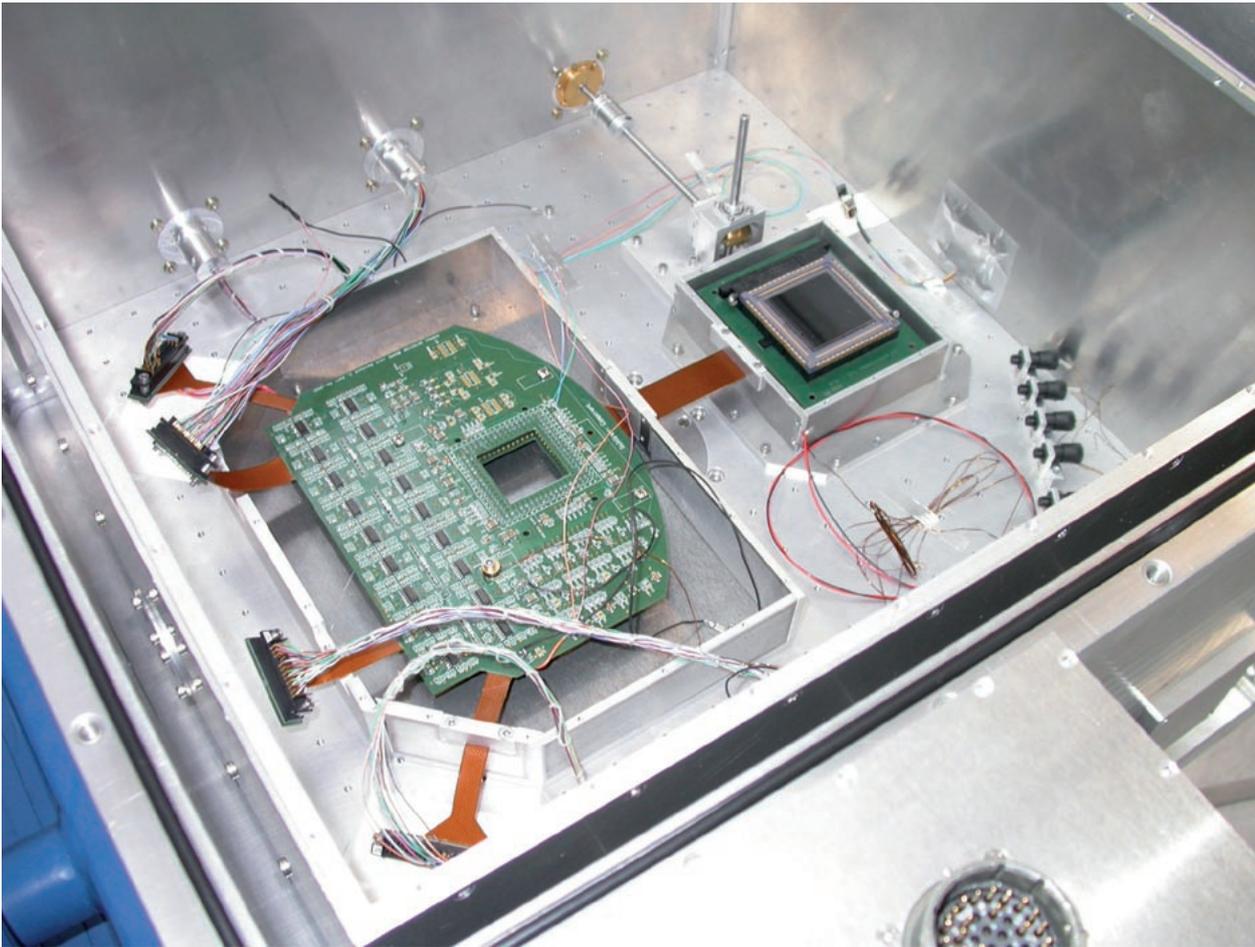


Abb. IV.1.6: Fanout-board und Detektor-Array während der ersten Detektortests im Testkryostaten.

Abb. IV.1.7: LUCIFER am Teleskopsimulator. Auf der Rückseite ist der Flansch für den Austausch der Maskenmagazine zu sehen. Der Kryostat ist provisorisch verkabelt, der Detektor ist in Betrieb.



Die Software

Die Software für LUCIFER wird an der Universität Bochum entwickelt. Das Software-Paket basiert auf der Plattformunabhängigen objektorientierten Sprache JAVA. Die Software ist in vier Ebenen angelegt, die dem Benutzer in der obersten Ebene über eine graphische Nutzeroberfläche besonders komfortable Bedienmöglichkeiten bietet. Die Software wurde zunächst am virtuellen LUCIFER-Instrument entwickelt und getestet, inzwischen kommt das Softwarepaket auch am wirklichen Instrument zum Einsatz.

Installationen am LBT

Zur Vorbereitung auf die Inbetriebnahme von LUCIFER I sind am LBT bereits diverse Vorinstallationen getroffen worden: Insbesondere wurde die feste Verlegung der Heliumdruckleitungen des Kühlsystems vom Kompressor

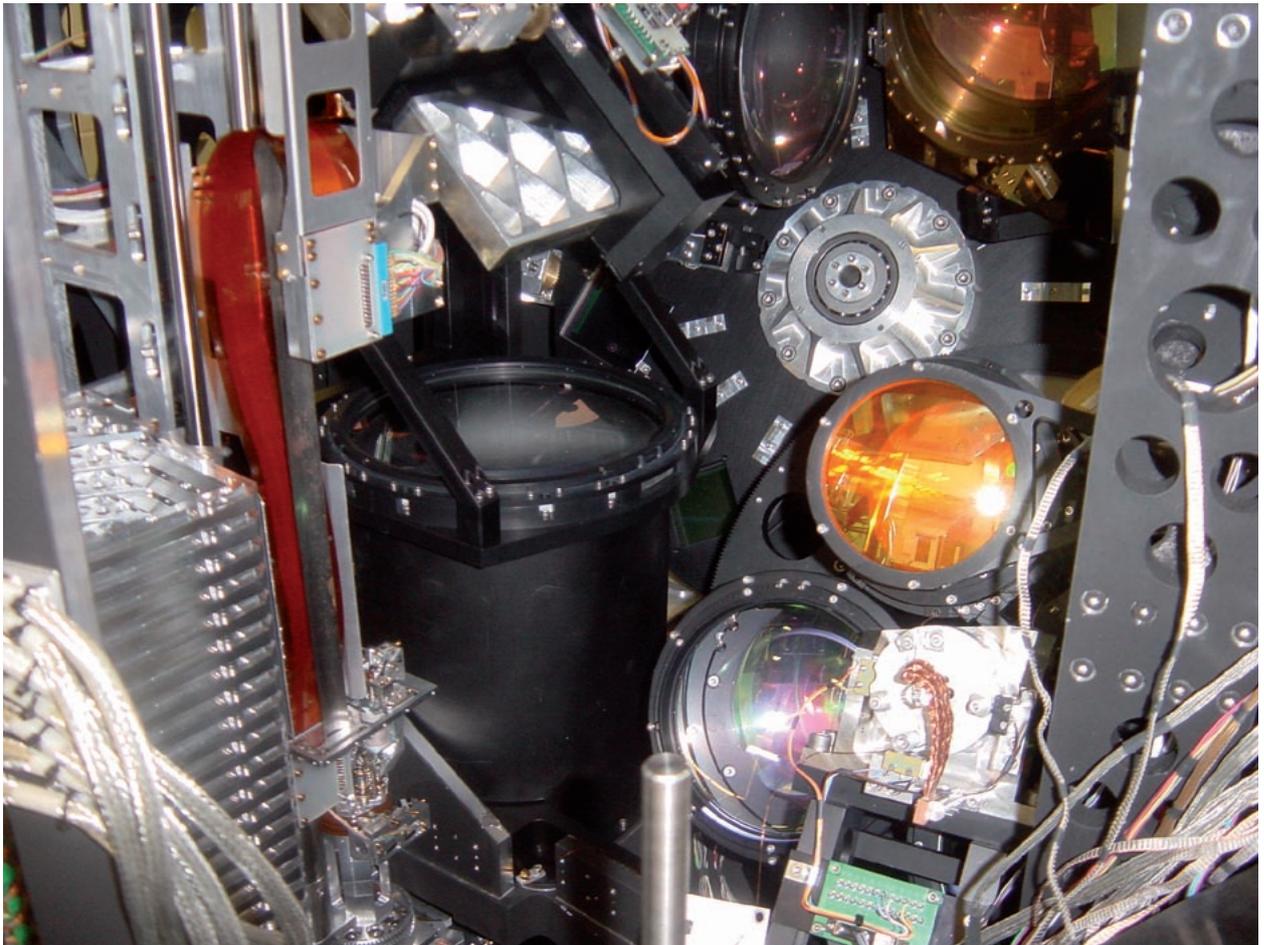
zum Kühlkopf am Kryostaten in die Wege geleitet. Für die vier Kompressoren wurden Schränke gebaut, die jeweils zwei Kompressoren aufnehmen können. Die abgegebene Wärme wird über ein Glykol-Kühlsystem abgeführt.

Status

Nachdem 2006 bereits das Kühlsystem eingebaut und getestet wurde, konnte LUCIFER I im Berichtsjahr in der Experimentierhalle des MPIA vollständig zusammengebaut und sukzessive getestet werden. Mit dem Test-Detektor wurde LUCIFER zunächst auf Hintergrundstrahlung hin untersucht. Zusätzliche Strahlungsschutzbleche und Verbesserungen an der Fokalmaskenhalterung konnten den Hintergrund schließlich auf Werte unterhalb des Detektor- Dunkelstroms reduzieren. Nach Verbesserungen des mechanischen Zusammenbaus und der Gitterwechseinrichtung konnte die Verformung

Abb. IV.1.8: Ein tiefer Blick in das verwirrende Innere von LUCIFER: Zur Linken das Magazin für die Fokalmasken mit dazugehörigem Roboter; der schwarze Tubus trägt die erste Linse des Kollimators, darüber ist der erste Faltspiegel zu sehen.

Rechts unten sieht man zwei Kameras auf dem Kamerarad, darüber die Achse des ersten Filterrades. Ganz oben sind noch die dritte Kollimatorlinse und ihr Spiegelbild im dritten Faltspiegel zu erkennen.



bei Drehung am Teleskopsimulator deutlich reduziert werden, hier bleibt allerdings noch einiges zu tun, um die Spezifikation zu erfüllen. Feinausrichtung der Kollimatorlinsen erbrachte schließlich auch eine befriedigende Bildqualität für die drei Kamerasysteme. Im Herbst 2007 wurde schließlich auch die MOS-Einheit eingebaut.

Parallel dazu diente der Kryostat von LUCIFER-II am MPE als Testkryostat für die erste MOS-Einheit. Das komplexe System wurde auf Zuverlässigkeit getrimmt, die MOS-Software von Fehlern befreit. Nach Auslieferung dieser ersten Einheit wird auch die zweite MOS-Einheit für LUCIFER II vorbereitet.

Nach dem gegenwärtig gültigen Zeitplan wird die Abnahme von LUCIFER I im April und seine Inbetriebnahme am LBT im Juni 2008 stattfinden. Das LBT wird dann mit einem festen Sekundärspiegel ausgestattet sein, der den noch nicht fertiggestellten adaptiven Sekundärspiegel ersetzt. Erste Tests mit LUCIFER I werden daher auf den Seeing-begrenzten Modus beschränkt sein. Die vollständige Anwendungsbreite einschließlich der adaptiven Optik wird für LUCIFER I voraussichtlich Ende 2008 zur Verfügung stehen. LUCIFER II wird dann im Abstand eines Jahres folgen.

Für weitere Details siehe:

www.lsw.uni-heidelberg.de/projects/LUCIFER

*Rainer Lenzen, Bernd Grimm,
Tom Herbst, Werner Laun,
Michael Lehmitz, Ralf-Rainer Rohloff,
Clemens Storz, Karl Wagner*

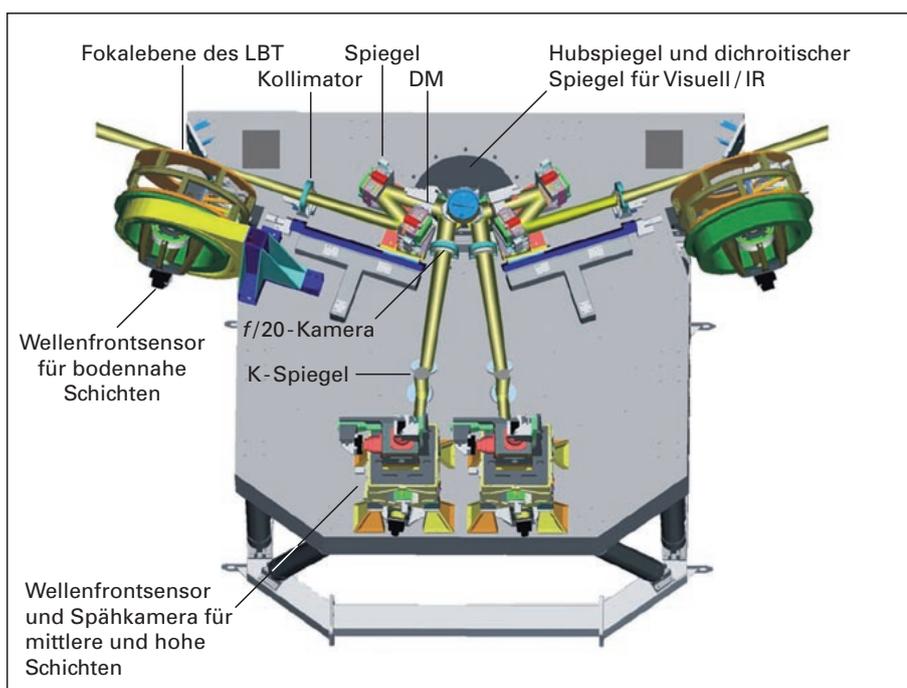
LINC-NIRVANA– die interferometrische Kamera für das LBT

LINC-NIRVANA (LN) ist ein innovatives Instrument, das dazu dient, das Licht der beiden 8,4-m-Primärspiegel des Large Binocular Telescope (LBT) mithilfe der Fizeau-Interferometrie auf einer einzigen Bildfläche zu kombinieren. Damit wird am LBT die Empfindlichkeit eines 12-m-Teleskops und die räumliche Auflösung eines 23-m-Teleskops erreicht. LINC-NIRVANA ist ein gemeinsames Projekt der deutschen und italienischen LBT-Partner mit wesentlicher Beteiligung des MPIA Heidelberg, INAF (Padua, Bologna, Arcetri, Rom), Köln und des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Bonn.

Das LN-Team erzielte im Jahr 2007 wesentliche Fortschritte in der Montage, der Integration und den Tests des Instruments. Zu den Höhepunkten zählt die Lieferung des ersten der vier Wellenfront-Sensoren an das LBT-Optiklabor in Heidelberg. MPIA- und INAF-Wissenschaftler integrierten den ersten Wellenfront-Sensor für mittlere und hohe Schichten, während die warme Voroptik des Instruments für einen geschlossenen Test der adaptiven Optik Anfang 2008 vorbereitet wird.

Darüber hinaus wurden die Arbeiten an dem kryogenen Wissenschaftskanal mit der Entgegennahme und Integration der kalten Test-Optik und dem Start der Integration der Bedienungsbühne und dem Test der größten Komponenten fortgesetzt. Ein neu konstruiertes Gebläse für die Kühlsysteme verspricht reduzierte aku-

Abb. IV.1.9: Warme Optik-Komponenten für LINC-NIRVANA.



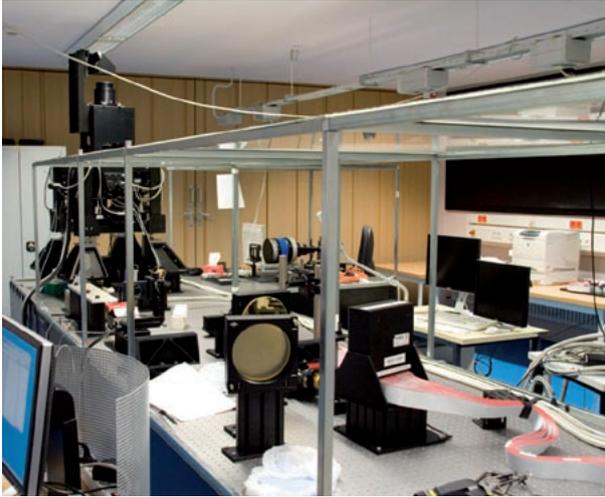


Abb. IV.1.10: Der erste Wellenfront-Sensor für mittlere und hohe Schichten (hoher Aufbau auf der hinteren linken Seite), integriert in die warme LN-Vor-Optik im Labor des MPIA.

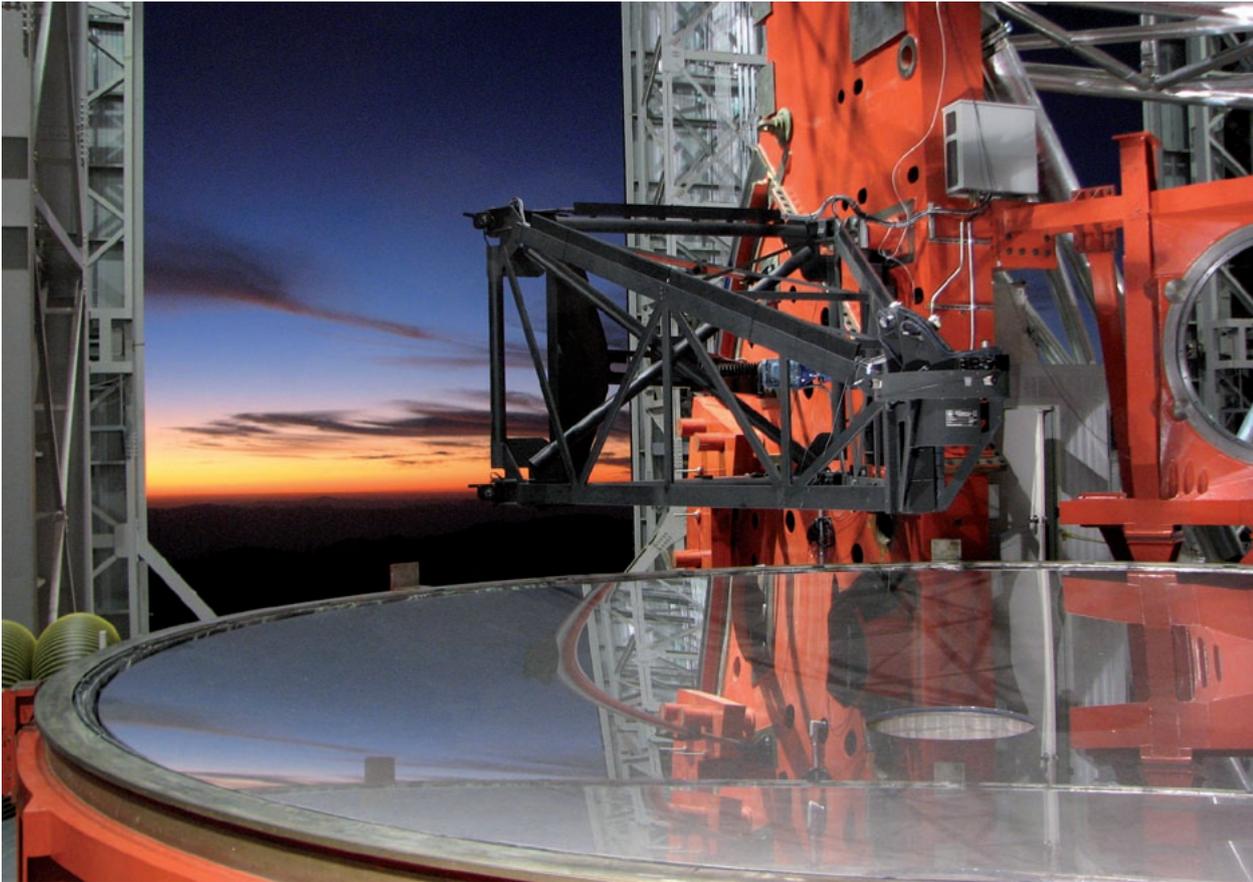
stische Vibrationen. Mittlerweile wurden die meisten Komponenten beschafft und die Montage und Prüfung der Subsysteme macht große Fortschritte. Ein letzter kritischer Aspekt ist der Biegungstest auf der großen optischen Bank des Reinraums im MPIA.

Darüber hinaus erfolgte 2007 durch Entwicklung der sogenannten »Design Reference Mission« oder DRM, eine erhebliche Neuformulierung der wissenschaftlichen Zielsetzung für LINC-NIRVANA. Hierbei handelt es sich um eine Reihe individueller wissenschaftlicher Szenarien, die mit realistischen simulierten Daten und einer Bildrekonstruktionssoftware durchgespielt werden. Die DRM verfolgt ein dreifaches Ziel. Zum einen hat sich der wissenschaftliche Kontext seit Beginn des Projekts weiterentwickelt. Darüber hinaus wurde die DRM speziell ausgewählt, um eine große Vielzahl von Instrumenten-Modi zu definieren und so die Konformität von Software und Hardware sicherzustellen. Des Weiteren bildet die Design Reference Mission ein kohärentes, hochwirksames wissenschaftliches Programm für die frühe Nutzung der einzigartigen Fähigkeiten des Instruments.



Abb. IV.1.11: Die obere Hälfte des Kryostaten für den Wissenschaftskanal wird für Biegungstests auf der großen optischen Bank des LINC-NIRVANA installiert.

*Harald Baumeister, Jürgen Berwein,
Peter Bizenberger, Armin Böhm, Luis Borelli,
Florian Briegel, Mario Brix, Fulvio De Bonis,
Sebastian Egner, Wolfgang Gässler, Tom Herbst (PI),
Frank Kittmann, Martin Kürster (PM), Lucas Labadie,
Werner Laun, Ulrich Mall, Daniel Meschke,
Lars Mohr, Vianak Naranjo, Alexei Pavlov,
Hans-Walter Rix, Ralf-Rainer Rohloff, Eva Schinnerer,
Thorsten Schmidt, Jürgen Schreiber, Clemens Storz,
Jan Trowitzsch, Karl Wagner,
in Zusammenarbeit mit:
INAF (Padua, Bologna, Arcetri, Rom, Genua),
Universität Köln, MPIfR Bonn*



Charakterisierung des LBT

Vibrationsmessungen

Zur Optimierung der Leistungsfähigkeit des Teleskops und seiner Messinstrumente wurden die Vibrationseigenschaften der beteiligten Strukturen und mögliche Maßnahmen zu deren Dämpfung untersucht. In einer Messkampagne im Oktober/November 2007 wurden beide Seiten des LBT unter typischen Betriebsbedingungen charakterisiert. Zahlreiche Parameter bestimmen die Vibrationseigenschaften an unterschiedlichen Stellen der Teleskopstruktur. Deshalb wurde erstmals ein Messsystem mit 16 parallelen Eingangskanälen verwendet, um die rechts-links-Asymmetrie der in ähnlichen Strukturen (z. B. im rechten und im linken Primärspiegel) auftretenden Beschleunigungen zu untersuchen. Mit Kenntnis der Amplituden und Frequenzen der stärksten Vibrationen werden sich Verfahren zu deren aktiver und passiver Kompensation (durch kontrollierte Aktuatoren bzw. durch Dämpfung) entwickeln lassen.

Mario Brix, Vianak Naranjo

Abb. IV.1.12: Vibrationsmessungen am Träger des Tertiärspiegels bei geöffnetem Schutzbau des LBT.

Teleskopsteuerungs-Software

Im Bereich der Steuerungs-Software für das LBT hat das MPIA zwei Arbeitspakete übernommen:

- die Instrument-Interface-Software (IIF) zur Steuerung der Kommunikation zwischen sämtlichen astronomischen Instrumenten des LBT und dem Teleskop;
- Die Software für die Nachführung des Teleskops (Guide Control System, GCS) und die Steuerung der aktiven Optik der beiden Hauptspiegel (Acquisition, Guiding and Wavefront sensing units, AGW), die bei denjenigen Instrumenten zum Einsatz kommen wird, die die Einheiten zur Nachführung und Wellenfrontsensorik verwenden.

Die beiden Arbeitspakete umfassen Design, Kodierung, Implementierung und Dokumentation der Software sowie ihre Inbetriebnahme zusammen mit den einzelnen Instrumenten. Die IIF-Software ist gemeinsam mit den beiden LBC-Primärfokus-Kameras bereits im Einsatz.

Zwei Software-Entwickler des MPIA sind für diese Aufgaben fest in das LBT-Software-Team in Tucson (Arizona) integriert. Im Fall des IIF-Pakets entfällt ein erheblicher Anteil der Arbeit des Software-Ingenieurs auf die

Koordination mit den verschiedenen Instrumentenbauern in Columbus (Ohio), Bochum, und Potsdam, dazu gehören auch regelmäßige ausgedehnte Aufenthalte in Tucson. Der Entwickler des GCS-Pakets ist längerfristig vom MPIA nach Tucson entsandt.

Martin Kürster, Luis Borelli, Torsten Leibold

Der Differenzial-Bildbewegungsmonitor

Eindeutige Erkenntnisse über die aktuellen Sichtbedingungen sind eine wesentliche Voraussetzung für den Erfolg des großen bodengebundenen Teleskops. Dieses Wissen ermöglicht reaktive Beobachtungen, in deren Rahmen die Reihenfolge der laufenden Programme an die aktuellen atmosphärischen Bedingungen angepasst werden kann. Langfristig kann die Korrelation der Sichtmessungen mit anderen jahreszeitlichen und meteorologischen Indikatoren helfen, die Bildqualität in einer beliebigen Nacht vorauszusagen. Dies ermöglicht eine effektivere Planung und bessere Nutzung der wertvollen Beobachtungsmöglichkeiten.

Im Jahr 2007 begann ein Team von MPIA-Wissenschaftlern mit der Konstruktion eines Differential Image Motion Monitor (DIMM – Differenzial-Bildbewegungsmonitor) für das LBT. Dieses Gerät misst die Sicht durch Aufzeichnung der Differenzialbewegung zweier Bilder eines einzelnen Sterns, die die Erdatmosphäre auf zwei leicht unterschiedlichen Wegen durchqueren. Es soll 2008 ausgeliefert werden.

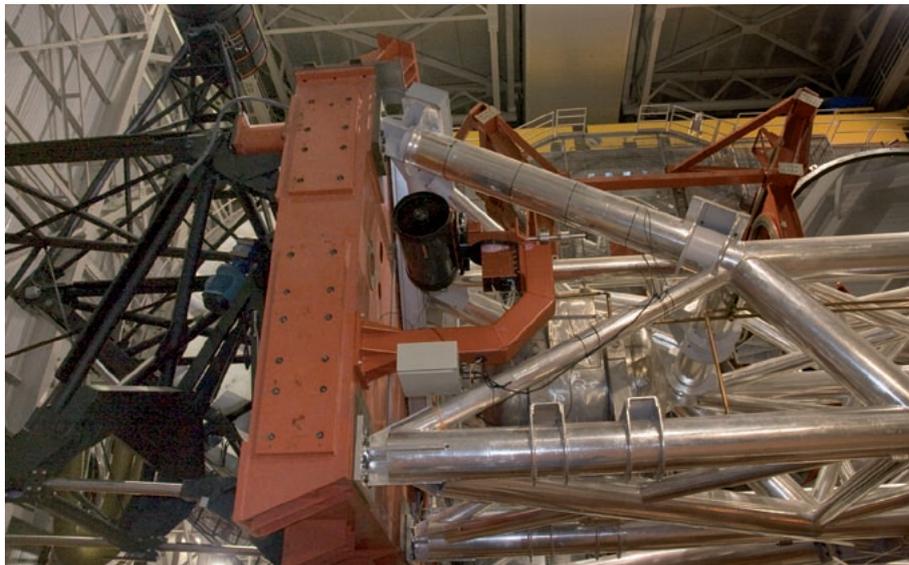
Abb. IV.1.13: DIMM, das kleine Teleskop auf J-förmiger Halterung, am oberen Ende des Large Binocular Teleskope.

Obwohl es sich weitestgehend um ein konventionelles Instrument handelt, musste DIMM eine besonders schwierige Herausforderung meistern, die sich aus den baulichen Beschränkungen auf Seiten des LBT ergab. Eine typische DIMM-Anlage umfasst einen kleinen Turm (ca. 10 m), der weit genug von den anderen Aufbauten entfernt ist, um eine Messung der Außenluftturbulenzen zu ermöglichen. Das große LBT steht jedoch in einem Naturschutzgebiet und neue Baugenehmigungen werden im Allgemeinen nicht erteilt. Aus diesem Grund entwickelte das MPIA-Team ein neues Halterungs- und Führungssystem, das es dem DIMM ermöglicht, einen Stern zu verfolgen, während es am LBT befestigt ist, das wiederum auf ein anderes Ziel gerichtet ist und dieses verfolgt.

Johannes Schmidt, Ralf-Rainer Rohloff, Armin Böhm

Die Infrarot-Testkameras

Das LBT verfügt als Einziges über vollständig adaptive Sekundärspiegel als Teil der Infrastruktur der Anlage. Diese Spiegel korrigieren atmosphärische Turbulenzen durch Krafteinwirkung auf eine dünne Membran aus aluminisiertem Glas, das von elektromagnetischen Kräften nahe einer dickeren Bezugsfläche gehalten wird. Die adaptiven Sekundärspiegel sind außerordentlich komplexe Systeme und erfordern geeignete Testgeräte für die Leistungsprüfung und Inbetriebnahme. Um diesen Prozess zu vereinfachen und zu beschleunigen, forderte das LBT-Observatorium Ende 2006 Vorschläge für ein Paar adaptiver Infrarot-Optiktestkameras an.



Das MPIA antwortete gemeinsam mit seinen Partnern in Bologna auf diese Anfrage und erhielt im März 2007 grünes Licht für die Entwicklung, Herstellung und Implementierung der Testkameras. Diese Geräte nutzen Nah-Infrarot-Detektoren mit extrem hoher Aufnahme­geschwindigkeit, die in der Lage sind, das aktuell gelieferte Teleskopbild bis zu einhundertmal pro Sekunde aufzunehmen. Drei unterschiedliche Sichtfelder ermöglichen die Charakterisierung des Kerns der Punktverbreiterungsfunktion (PSF), der schwächeren Flügel der PSF sowie eine breite Bildebene des Teleskops.

Im Januar 2008, neun Monate nach der Startbesprechung, lieferte das Team die erste der beiden Kameras für den adaptiven Optiktest-Turm in Florenz, wo die Kamera zur Spezifikation der Sekundärspiegel vor der Lieferung an das Teleskop eingesetzt werden. Drei Monate später wurde die zweite Kamera direkt an das LBT geliefert, um die Inbetriebnahme der Gregory-Foki vor dem Eintreffen des ersten LUCIFER-Instruments zu unterstützen.



*Daniel Meschke, Ralf-Rainer Rohloff,
mit Kollegen der Universität Bologna,
Observatorium Bologna*

Abb. IV.1.14: Testkamera 1 (*links*) montiert an dem adaptiven Optiktest-Turm in Florenz. Testkamera 2 (*unten*) wurde an den Gregory-Fokus angeschlossen, der ab Herbst 2008 von LUCIFER I besetzt wird.



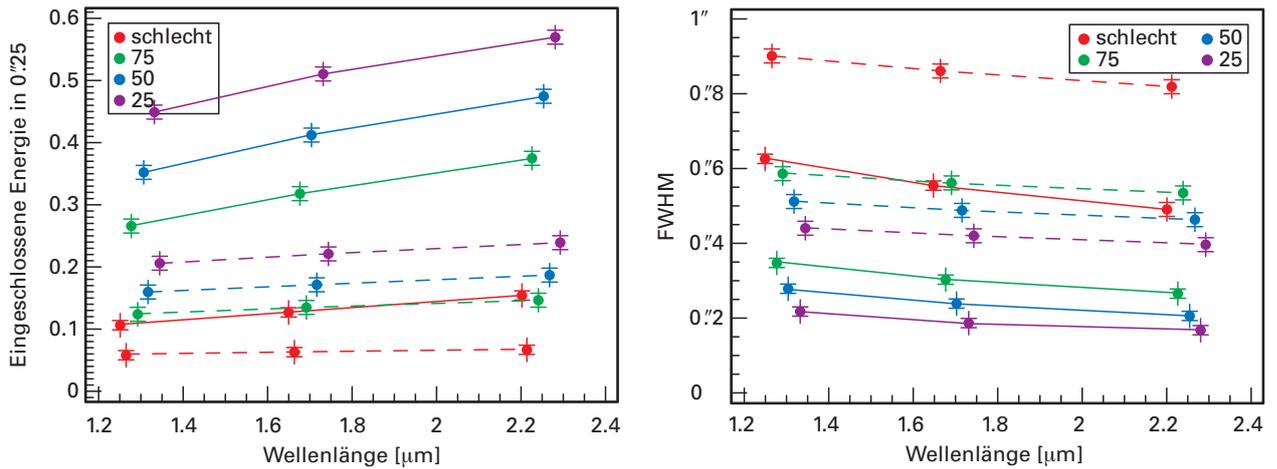


Abb. IV.1.15: Simulation der Energiekonzentration in 0''25 (*links*) und FWHM (*rechts*) in Abhängigkeit von der Wellenlänge, für unterschiedliche über Mt. Graham gemessene Turbulenzprofile der Atmosphäre. Die durchgezogene Linie zeigt das durch

GLAO verbesserte Resultat, während die gestrichelte Linie das unkorrigierte Ergebnis zeigt. Das schlechteste Profil hat eine Bildqualität von 1''18.

Phase-A-Studie zum Laserleitstern

Laserleitsterne revolutionieren die bodengebundene Nahinfrarotastronomie mit adaptiver Optik und Interferometrie. Dies haben bereits mehrere Laserleitsysteme an verschiedenen Teleskopen demonstriert, z.B. der Laserleitstern PARSEC für SINFONI und NACO am VLT oder der Laserleitstern des Keck-Teleskops auf Hawaii. Mit adaptiver Optik, die nur die untersten Schichten der Atmosphäre korrigiert, im Englischen Ground Layer Adaptive Optics (GLAO), lässt sich die Bildqualität über ein weites Gesichtsfeld um mindestens einen Faktor 1.5 und die Energiekonzentration um mindestens einen Faktor 2 verbessern. Dies erhöht die Effizienz des Teleskops wenn die Turbulenz in der Atmosphäre sehr hoch ist. Die Phase-A-Studie begann im Juli 2007 und wird im März 2008 enden. Ihr Ziel ist die Untersuchung der Vorteile

eines solchen Instruments und seiner schnellstmöglichen Realisierung. Zusätzlich wird geprüft, wie ein solches Instrument zukünftig auch in einem beugungsbegrenzten Modus für hohe Bildqualität über ein kleines Feld oder für geringere Qualität über ein größeres Feld für den Einzel- oder den interferometrischen Betrieb beider Kanäle des LBT genutzt werden kann.

*Wolfgang Gäsler,
in Zusammenarbeit mit:
Sebastian Rabien (MPE),
Simone Esposito (INAF-OAA),
Michael Loyd-Hardt (UA),
Andreas Quirrenbach (LSW),
Jesper Storm (AIP)
und Richard Green (LBTO)*

IV.2 Instrumente für das VLT

Katzenaugenoptiken für die optischen Verzögerungsstrecken von PRIMA

PRIMA, das Instrument für die phasenbezogene Bilderfassung und Mikrobogensekunden-Astrometrie, implementiert die Dual-Feed-Kapazitäten des Very Large Telescope Interferometers (VLT). Es ermöglicht die simultane interferometrische Beobachtung zweier Objekte, die um bis zu eine Bogenminute voneinander getrennt sind.

PRIMA dient dazu, astrometrische Aufnahmen in einem kleinen Gesichtsfeld im K-Band mit zwei Hilfsteleskopen des VLT durchzuführen und eine phasenbezogene Blendensynthese-Bilderfassung mit Instrumenten wie AMBER und MIDI zu ermöglichen. Das Instrument besteht aus vier großen Untersystemen: Sternseparatoren (STS), einem Laser-Metrologiesystem (PRIMET), FRINGE Sensor Units (FSUs) und optischen Verzögerungsstrecken (DDLs). Die ersten drei Subsysteme werden derzeit bei ESO getestet. Um die vollständige Implementierung der 10-Mikrobogensekunden-Astrometrie zu beschleunigen und ein umfangreiches Exoplaneten-Suchprogramm (ESPRI) durchzuführen, baut das MPIA in Zusammenarbeit mit dem Observatoire de Genève und der Landessternwarte Heidelberg die optischen Verzögerungsstrecken für PRIMA und entwickelt die Software zur Vorbereitung der Beobachtungen und zur Datenreduktion.

Die PRIMA-Anlage soll 2009 vollständig betriebsbereit sein. Als Gegenleistung erhält das Konsortium garantierte Beobachtungszeit an zwei Hilfsteleskopen mit PRIMA für das Suchprogramm ESPRI.

Die Messmethode

Ein aus zwei Teleskopen bestehendes Interferometer misst die Verzögerung zwischen den Wellenfronten eines Sterns bei deren Auftreffen an den Teleskopen. Atmosphärische Trübungen verhindern jedoch im Allgemeinen genaue Messungen der absoluten Verzögerung. Um dieses Problem zu umgehen, misst ein Doppelstern-Interferometer die differenzielle Verzögerung zwischen zwei Sternen. Wenn deren Winkelabstand geringer ist als der isoplanetische Winkel (ca. 10 Bogensekunden im K-Band), sind die Trübungen der beiden Wellenfronten korreliert und die durchschnittlichen differenziellen Störungen $\Delta\text{OPD}_{\text{turb}}$ mitteln sich schnell weg.

Wenn einer der Sterne hell genug ist, um seine Streifenphase innerhalb der atmosphärischen Kohärenzzeit zu messen, kann dieser genutzt werden, um die Streifen des anderen Sterns zu stabilisieren (Fringe tracking) und so

längere Integrationszeiten und die Erhöhung der Anzahl der beobachteten Objekte zu ermöglichen.

Um Interferenzstreifen auf dem Detektor zu erhalten, muss die externe Verzögerungsdifferenz, die durch die Interferometer-Basislinie (B) direkt mit dem Winkelabstand $\Delta\alpha$ verbunden ist, mit optischen Verzögerungsstrecken im Interferometer kompensiert werden. Die Sehstrahlen der beiden Sterne werden zunächst parallel durch eine Hauptverzögerungslinie geleitet, um den Effekt der Luftturbulenzen in den Tunneln zu minimieren.

Aufgrund des endlichen Winkelabstands zwischen den beiden Sternen und der täglichen Bewegung besteht jedoch auch eine variable differenzielle OPD zwischen den beiden Sternen, die mit differenziellen Verzögerungsstrecken kompensiert werden muss. Die Verzögerungsstrecken werden im Vakuum betrieben und bieten einen sehr viel kleineren Fahrweg (≤ 60 mm). Auf einer Basislinie von 100 Metern entsprechen 10 Mikrobogensekunden 5 Nanometer OPD. Dies definiert die gesamte Fehlertoleranz für optische Verzögerungsstrecken sowie für die Streifenerkennung und die Metrologie. Die Strahlen der beiden Teleskope werden dann in den PRIMA Fringe Sensor Units (FSU) interferometrisch kombiniert.

In der Nullstreifen-Position sind die externen und internen Verzögerungen gleich. Die laserüberwachte interne Verzögerung ($\Delta\text{OPD}_{\text{int}}$) sowie die restliche differentielle Streifenphase ($\Delta\text{OPD}_{\text{FSU}}$) sind dann die Hauptbeobachtungsgrößen des Interferometers (siehe Abb. IV.2.1).

Abb. IV.2.1: Messprinzip: Schmalwinkel-Astrometrie mit differenzieller Verzögerungs-Interferometrie. Die Verzögerung $\Delta\text{OPD}_{\text{int}}$ entsteht in der DDL.

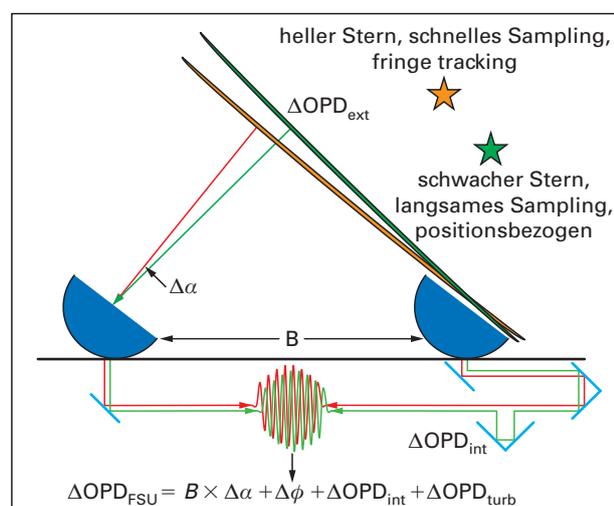




Abb. IV.2.2: DDL-Katzenaugen im optischen Labor des MPIA, bereit für die Wellenfrontmessungen.

Über das gesamte Bildfeld (\varnothing 10 Bogenminuten)	
Positionsgenauigkeit	< 100 nm rms
Mechanische Führung der optischen Achse	< 15 μ m (PtP)
Pupillenversatz über 70 mm Weg	< 50 μ m (PTV)
Optische Pupillenaberration	< 25 μ m rms
Maximaler Neigungsfehler (ein/aus)	< 1.5 Bogensekunden
Maximale Neigungsdifferenz	< 0.75 Bogensekunden
OPD-Korrektur	
Grobe Weglänge	70 mm (durch Translation)
Feine Weglänge (Piezo)	10 μ m (durch Bewegen von M3)
OPD- Auflösung	< 2.5 nm (Ziel: < 1.0 nm)
Bandbreite	> 200 Hz

Tabelle IV.2.1: Spezifikationen für das PRIMA-DDL-System

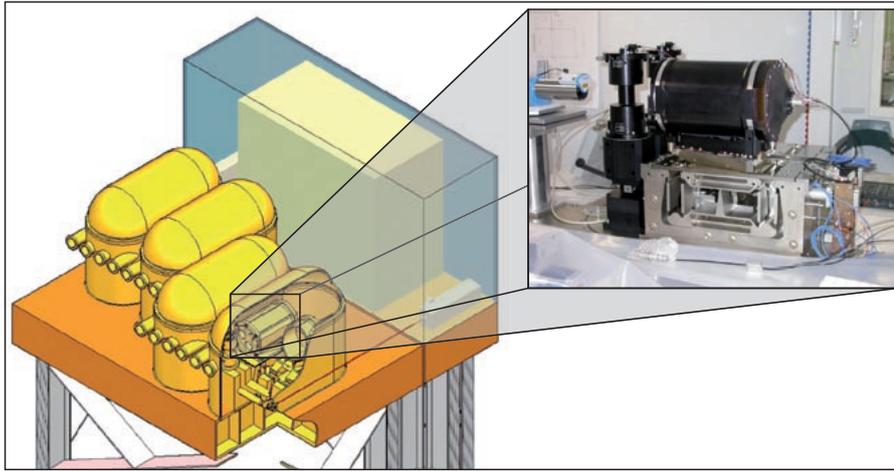
Strahldurchmesser	18 mm
Gesichtsfeld am Ort der Pupille	10 Bogenminuten
Abstand zw. ein- und auslaufendem Strahl	120 mm
Wellenfront-Abweichung	< 20 nm rms
Neigung des ein- und auslaufenden Strahls	< 0.5 Bogensekunden (auf der Achse)
Differentielle Neigung	< 0.2 Bogensekunden
Wellenlängenbereich	0.6 – 28 μ m
Transmission insgesamt	> 95 % für λ > 1.0 μ m
Maximales Gewicht	12 kg (einschl. Platten)
Minimale Eigenfrequenz	> 200 Hz

Tabelle IV.2.2: Spezifikationen für die Katzenaugenoptik

An den Hilfsteleskopen beträgt die für das Fringe-Tracking erforderliche Mindesthelligkeit im K-Band 14 mag. Die von den Bezugsternen zum Erreichen einer Genauigkeit von zehn Mikrobogensekunden benötigte Mindesthelligkeit im K-Band beträgt 14 mag. Die maximale Trennung zwischen Ziel- und Bezugstern beträgt ca. 15 Bogensekunden.

Hardware-Entwicklungen

Das Konzept der DDL wurde von dem Konsortium in enger Zusammenarbeit mit ESO entwickelt. Die DDL bestehen aus Retroreflektor-Teleskopen der Cassegrain-Bauart, die vollständig aus Aluminium gefertigt sind (Katzenaugen). Diese Teleskope mit einem Durchmesser von ca. 20 Zentimetern sind auf festen linearen Verschiebetischen montiert. Ein Stufenschalter am Verschiebetisch ermöglicht Fahrwege von bis zu 60 Millimetern. Ein Piezo-Schalter am M3-Spiegel im Katzenauge ermöglicht eine zusätzliche Feineinstellung von 10 Mikrometern mit einer Genauigkeit von einem Nanometer. Beide Schalter werden von einem Steuerkreis angetrieben, sodass der optische Pfad stufenlos in einem Bereich von 120 Millimetern (doppelte Fahrweglänge) und einer Genauigkeit von zwei Nanometern eingestellt werden kann. Die DDL wurden gemeinsam mit einem internen Metrologiesystem auf einer eigens angefertigten optischen Bank in nicht gekühlten Vakuumentanks installiert.



Der wichtigste Hardware-Beitrag des MPIA bestand in der Entwicklung und Lieferung von vier Katzenaugenteleskopen. Die ehrgeizige angestrebte astrometrische Genauigkeit am Himmel von 10 Mikrobogensekunden (siehe Tabelle IV.2.1) führte zu sehr anspruchsvollen technischen Spezifikationen für das Katzenaugenobjektiv (Tabelle IV.2.2). Das MPIA beauftragte 2006 die Firma AXSYS aus Detroit mit der Herstellung des Katzenaugenteleskops.

Das erste der vier optischen Systeme wurde im August 2007 an das MPIA geliefert und zwei Monate lang umfassend getestet. Ein neues, eigens dafür ausgestattetes optisches Labor mit Spezialmessgeräten wurde im MPIA eingerichtet, um die Erfüllung der anspruchsvollen technischen Spezifikationen zu überprüfen (siehe Tabelle IV.2.2).

Abb. IV.2.2 zeigt die Testanlage im MPIA zur Messung der von der Katzenaugenoptik eingefangenen Wellenfrontabweichungen. Alle vier Katzenaugen erfüllten die technischen Anforderungen. Die erste Katzenaugenoptik wurde anschließend an unseren Projektpartner

Abb. IV.2.3: Schematische Darstellung der Differential Delay Lines für PRIMA.

in Genf ausgeliefert, dort in die anderen DDL-Komponenten integriert und für die Systemabnahmetests vorbereitet (Abb. IV.2.4 und Abb. IV.2.5).

Die Firma AXSYS lieferte die anderen drei Katzenaugenoptiken beginnend mit November 2007 an das MPIA. Auch diese wurden nach den Tests im MPIA nach Genf geliefert, wo das vollständige DDL-System vor dem Versand zum Paranal integriert und getestet wird.

Die hochwertigen optischen Fenster für die Vakuums tanks wurden von der Firma Halle (Berlin) hergestellt. Auch die Fenster wurden im MPIA getestet und erfüllten die hohen Genauigkeitsanforderungen.

Abb. IV.2.4: Ralf Launhardt, Jonny Setiawan und Thomas Henning (von links) im DDL-Integrationslabor in Genf. Im Vordergrund sind zwei der DDL zu sehen.





Abb. IV.2.5: Die drei Projektleiter Didier Queloz (Genf), Thomas Henning (MPIA) und Andreas Quirrenbach (LSW Heidelberg vor einem Schokoladenmodell der DDL (jetzt mit Vakuumtank) bei der Taufe in Genf.

Software-Entwicklungen

Die Software-Entwicklungen des ESPRI-Konsortiums umfassen die Software für die Vorbereitung der PRIMA-Astrometrie (von Genf aus koordiniert) und das komplette astrometrische Datenreduktionspaket (koordiniert bei der LSW). Die Reduktion der Daten auf kalibrierte Verzögerungen erfolgt vollautomatisch mit zwei Leitungen und einer Reihe von Kalibrierungsparametern, die im Abstand von einigen Monaten jeweils neu aus allen verfügbaren PRIMA-Astrometriedaten abgeleitet werden. Die Software-Pakete werden vor der Inbetriebnahme des Instruments an ESO geliefert und stehen allen Benutzern zur Verfügung. Die Umwandlung der kalibrierten Verzögerungen in physikalische Größen wie etwa Planetenbahnen obliegt dem wissenschaftlichen Nutzer.

Vorbereitung des Beobachtungsprogramms

Wir planen ab 2009 die Durchführung einer systematischen Exoplanetensuche mit PRIMA (ESPRI) mit folgenden Zielen:

- (i) Genaue Bestimmung der planetaren Masseverteilung
- (ii) Entdeckung neuer Planeten um nahe Sterne mit Massen zwischen der Saturn- und der Uranus-Masse
- (iii) Entstehung und Entwicklung mehrfacher Planetensysteme
- (iv) Erforschung der Planetenbildung und -entwicklung in Abhängigkeit vom Alter und von der Masse

Dazu haben wir drei Objektlisten mit insgesamt fast 900 Sternen erstellt:

1. Sterne mit bekannten, mit der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckten Planeten
2. Nahe Hauptreihensterne innerhalb einer Entfernung von 15 Parsec um die Sonne.
3. Junge, 5 bis 300 Millionen Jahre alte Sterne innerhalb von 100 pc um die Sonne.

Derzeit führen wir ein umfassendes vorbereitendes Beobachtungsprogramm durch, um geeignete astrometrische Bezugssterne zu identifizieren und die Zielsterne der Planetensuche zu charakterisieren. Mit einer endgültigen Erkennungsrate für Bezugssterne von 10 bis 15 Prozent werden wir 100 bis 150 Sterne auf astrometrische Signaturen extrasolarer Planeten hin untersuchen.

Auf dem Weg zur Inbetriebnahme

Die Integration der ersten Subsysteme für PRIMA auf dem Paranal begann im Januar 2008. Als letztes Subsystem werden die DDL an das Paranal-Observatorium geliefert und im Juli 2008 integriert. Nach Abschluss der Montage und Integration ist die erste Inbetriebnahme am Himmel für Ende 2008 geplant. Die Inbetriebnahme mit den Unit Teleskopen folgt, sobald alle Systemfehler behoben sind und ein stabiles Fringe tracking möglich ist. Das Konsortium einschließlich des MPIA ist an der Inbetriebnahme unter Verantwortung der ESO beteiligt.

*Harald Baumeister, Peter Bizenberger,
Uwe Graser, Thomas Henning,
Ralf Launhardt, Vianak Naranjo,
Johny Setiawan, Karl Wagner
Partner: Genfer Observatorium,
Landessternwarte Heidelberg, ESO*

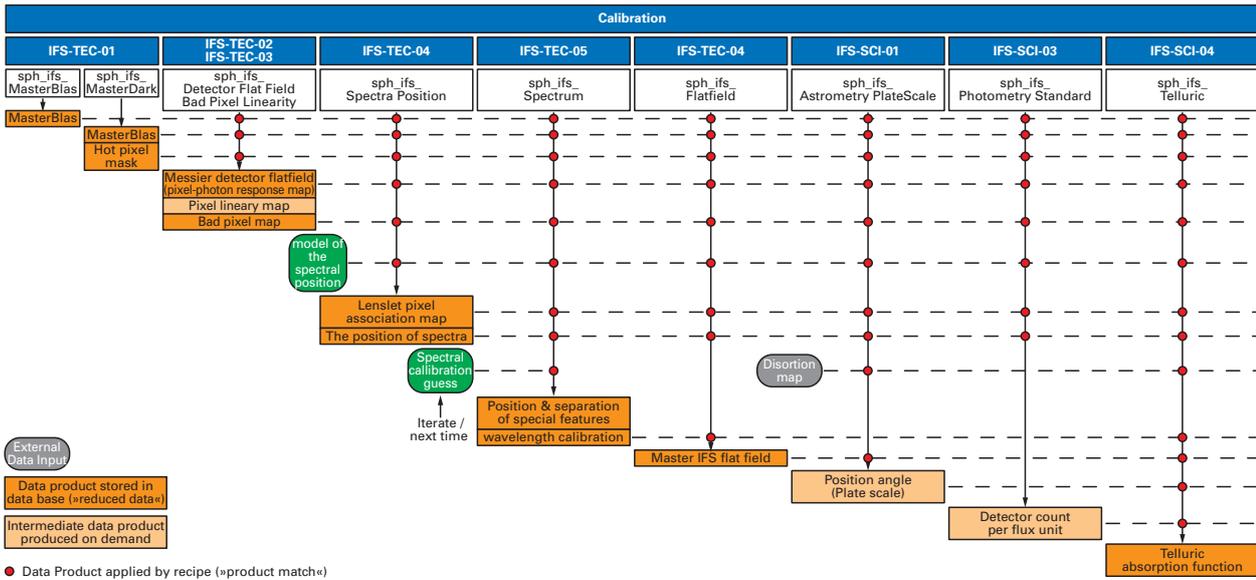


Abb. IV.2.6: Die Datenprodukt-Verknüpfungsmatrix für das Teelinstrument IFS.

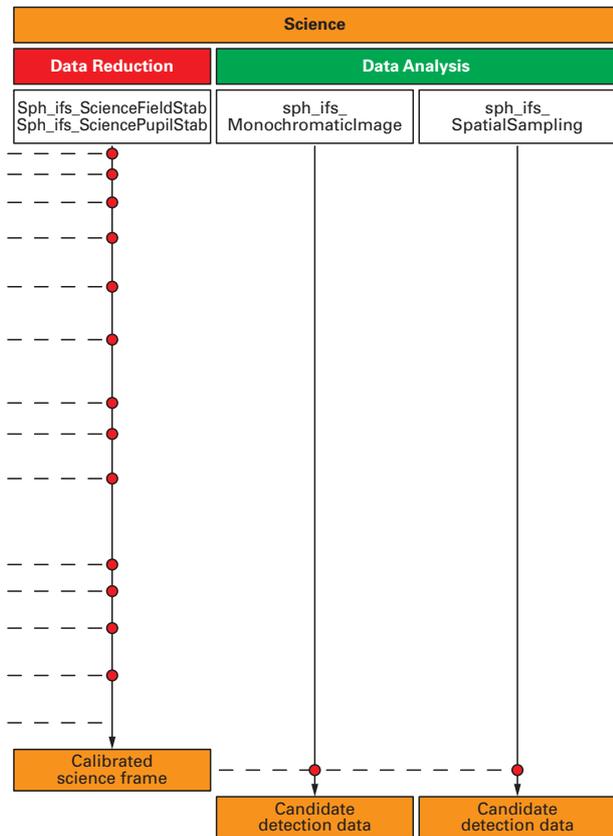
SPHERE

SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research) ist ein Projekt zur direkten Abbildung extrasolarer Planeten am VLT der Eso. Das MPIA ist Co-PI-Institut des einschließlich der Eso zwölf europäische Institute umfassenden SPHERE-Konsortiums.

SPHERE befindet sich gegenwärtig in der endgültigen Entwurfsphase (C), der »Final Design Review« ist für Dezember 2008 geplant. Der »Preliminary Design Review« wurde 2007 erfolgreich bestanden. SPHERE besteht aus einem Hochleistungs-AO-System und drei Fokalinstrumenten, die alle die Technik der Differenzabbildung anwenden, um verbleibendes Streulicht der Zentralsterne in den Griff zu bekommen: Das 3D-Spektrometer IFS, die Differenzbildkamera IRDIS und das differentielle Polarimeter ZIMPOL bilden das Arsenal zur direkten Planetenabbildung.

Das MPIA ist in diesem Projekt im wesentlichen auf drei Feldern engagiert: Zum einen leitet es verantwortlich die Entwicklung der Datenreduktions-, Datenanalyse- und Datenflusskontrollsoftware. Mit mittlerweile mehr als 76 verschiedenen Prozeduren stellt SPHERE das datenreduktionstechnisch betrachtet bei weitem komplexeste Instrument dar, welches bislang an ESO ausgeliefert wurde. Abb. IV.2.6 zeigt die Datenproduktverknüpfungsmatrix (Product association map) für das Teelinstrument IFS. Hier sind erstmals bei ESO auch automatische Pipelines zur Analyse der Daten vorgesehen.

Auf der Hardware-Seite trägt das MPIA durch Konstruktion und Fertigung der Korrektoren für die atmosphä-



rische Dispersion bei, sowie durch die Bereitstellung einer Detektor-Verschiebeeinheit (Weg = 0.2 mm × 0.2 mm, Arbeitstemperatur = -200 °C).

Für diese Einheit wurde am MPIA gemeinsam mit der Firma Physik Instrumente (PI) ein NEXLINE® Piezoschrittantrieb speziell für den Einsatz bei tiefen Temperaturen konzipiert und aufgebaut (Abb. IV.2.7).

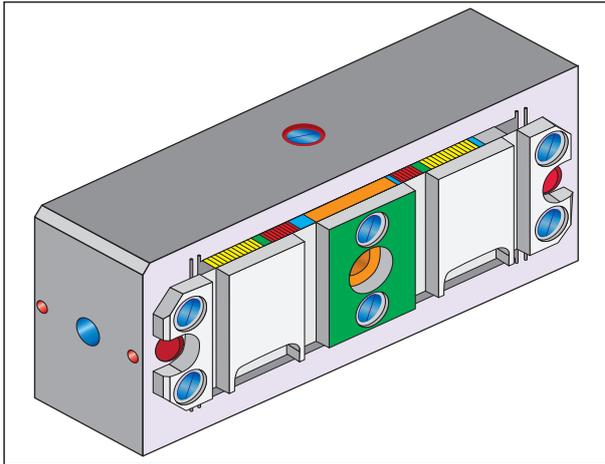


Abb. IV.2.7: Das CAD-Modell (oben) und der fertige Nexline®-Aktuator.

Diese Aktuatoren garantieren hohe Auflösung, lange Stellwege und Selbsthemmung im Ruhezustand. Sie sind nun erstmals auch im Kryo-Bereich angewendet worden und fürderhin serienmäßig für diesen Bereich verwendbar.

*Markus Feldt
und das SPHERE-Konsortium*

VLT-Instrumente der zweiten Generation

MATISSE

Das Multi Aperture Mid-Infrared SpectroScopic Experiment, wurde 2006 von ESO als eines von drei VLTI-Instrumenten der zweiten Generation für eine Phase-A-Studie ausgewählt.

Nach dem Abschluss der Phase-A-Studie im Juni 2007 genehmigten die verantwortlichen ESO-Ausschüsse (das STC und kurz danach der Rat) die Entwicklung dieses Mittelinfrarot-Spektrointerferometers. MATISSE ist da-

her in gewisser Hinsicht der Nachfolger von MIDI, dem interferometrischen Mittelinfrarot-Instrument, das am MPIA konstruiert wurde und seit 2003 auf dem Paranal in Betrieb ist.

MATISSE kombiniert die Strahlen von bis zu allen vier 8-m-Teleskopen des VLT oder von bis zu vier der 1.8-m-Hilfsteleskope des Very Large Telescope Interferometers auf dem Paranal. MATISSE kann Messungen im »Closure-Phase-Modus« vornehmen und erlaubt damit eine effiziente Bildrekonstruktion mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 10 Millibogensekunden. Das Instrument arbeitet in drei Wellenlängenbändern: L, M und N, wobei das L- und das M-Band ($3 - 5.4 \mu\text{m}$) neue spektrale Fenster für das VLTI öffnen. Darüber hinaus können L-Band-Beobachtungen simultan zum N-Band ($7 - 13 \mu\text{m}$) durchgeführt werden.

Die interferometrische Spektroskopie wird mit drei unterschiedlichen spektralen Auflösungen im Bereich $R = 30 - 1500$ ermöglicht. Dies gestattet eine grundlegende Analyse der Zusammensetzung von Gas und Staub in verschiedenen astrophysikalischen Umgebungen.

Zu den hauptsächlichen wissenschaftlichen Programmen für die Hilfsteleskope zählen beispielsweise die Erforschung der Entstehung und Entwicklung von Planetensystemen und der Geburt massereicher Sterne, und die Beobachtung der Umgebung heißer oder veränderlicher Sterne mit hohem Kontrast. Weiterhin werden an den 8-Meter-Spiegeln etwa Untersuchungen aktiver galaktischer Kerne und extrasolarer Planeten möglich sein.

Matisse wird in einer Kooperation des Observatoire de la Côte d'Azur mit dem MPIA, dem MPI für Radioastronomie in Bonn, sowie dem holländischen Institut Astron in Dwingeloo und der Universität Leiden entwickelt und gebaut.

Das MPIA leistet einen wesentlichen Beitrag zu MATISSE: Mit dem Projektwissenschaftler Sebastian Wolf (Co-PI, jetzt Universität Kiel, s. Seite 133) leitet es den wissenschaftlichen Teil des Projekts. Darüber hinaus ist das Institut für die kryogenen Systeme einschließlich des großen Kryostaten, die gesamte Steuerelektronik und die Instrumentensteuerungs-Software verantwortlich. Zusätzlich übernimmt das MPIA weitere kleinere Arbeitspakete wie etwa die Software für die Bildrekonstruktion, die Integration und Tests des Instruments etc.

Das grundlegende Konzept für MATISSE wurde im Verlauf der Phase-A-Studie entwickelt. Hierbei mussten verschiedene Schwierigkeiten überwunden werden. Lange Zeit war unklar, ob der neue N-Band-Detektor zur Verfügung stehen würde. Die Firma Taytheon hatte die Entwicklung dieses neuen, »Aquarius« genannten $1 \text{ K} \times 1 \text{ K}$ Mittelinfrarot-Detektors gestoppt und forderte zusätzliche Gelder von ESO. Diese Mittel wurden im September bereitgestellt, und die Ersatzlösung der Verwendung des $1 \text{ K} \times 1 \text{ K}$ -MegaMir-Detektors (kleinere Pixelgröße) von DRS Technologie konnte aufgegeben werden.

Der zukünftige Standort von MATISSE im interferometrischen Labor ist ein weiteres noch ungelöstes Problem. Da MATISSE nahezu doppelt so groß ist wie MIDI, kann es dieses nicht einfach ersetzen. Dieses Problem wird gegenwärtig mit ESO besprochen.

Ein weiteres Thema im zweiten Halbjahr 2007 war die Entwicklung eines geeigneten kryogenen Konzepts für die riesige kalte optische Bank und die verschiedenen in MATISSE zu verwendenden Temperaturstufen. Mit einer kalten Optik bei 40 K, den Detektoren bei 35 K (L-Band) und 8 K (N-Band) und ihren Vorverstärkern bei mehr als 80 K war die Integration in einen Kryostaten problematisch, da dieser aufgrund seiner Größe (doppelt so groß wie bei MIDI) bereits seine Grenzen erreicht hatte und unter anderem durch den geringen verfügbaren Platz im interferometrischen Labor beschränkt ist. Derzeit planen wir das Treffen zum Start des Projekts und für die Definition der Verträge mit ESO.

*Sebastian Wolf, Uwe Graser, Thomas Henning,
Werner Laun, Karl Wagner, Udo Neumann*

GRAVITY

GRAVITY ist ein auf adaptive Optik gestütztes Instrument der zweiten Generation für das Very Large Telescope Interferometer der ESO. Es kombiniert das Licht aus allen vier 8-m-Teleskopen des VLT zur interferometrischen, phasenbezogenen Bilderfassung mit einer Auflösung von 4 Millibogensekunden und zur Astrometrie kleiner Winkel mit einer Genauigkeit von 10 Mikrobogensekunden für schwache Quellen von bis zu $K = 20$ mag.

GRAVITY bestand 2007 erfolgreich seine Phase-A-Prüfung bei ESO. Derzeit finden die Vertragsverhandlungen mit ESO für die Vorplanungs- und abschließende Konzeptphase statt. Die ersten mit diesem Instrument gewonnenen Bilder werden für 2012 erwartet.

GRAVITY wird von einem Konsortium aus vier Partnern gebaut: dem Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (hauptverantwortlich), PHASE (selbst ein Konsortium aus französischen Instituten einschließlich des Observatoire de Paris und des Observatoire de Grenoble), der Universität Köln und dem MPIA.

GRAVITY wird das einzigartige Gesichtsfeld des VLTI mit einem Durchmesser von 1.7 Bogensekunden nutzen. Durch die Messung des Winkelabstands zwischen zwei Objekten innerhalb dieses Felds sollte sich die astrometrische Genauigkeit gegenüber dem aktuellen für PRIMA definierten Ziel auf das Zehnfache steigern lassen. Am MPIA werden die optische Verschiebeanlage und die Infrarot-Wellenfrontsensoren für GRAVITY entwickelt. Die im VLTI-Labor aufgestellten Infrarot-Wellenfrontsensoren erkennen nicht nur atmosphärische Turbulenzen, sondern auch die in der Strahlrelaisoptik des VLTI auftretenden Wellenfrontfehler. Kombiniert mit dem auf integrierter Optik basierenden interferometrischen Instrument und der Nutzung aller vier 8-m-Teleskope, wird GRAVITY eine unübertroffene Kombination aus Empfindlichkeit und astrometrischer Genauigkeit erzielen.

Das mit GRAVITY angestrebte wissenschaftliche Ziel ist eine astrometrische Studie der nahen Umgebung des supermassereichen Schwarzen Lochs im Galaktischen Zentrum. GRAVITY wird in der Lage sein, die Umlaufbahnen der Sterne, die vom Schwarzen Loch nur wenige Schwarzschild-Radien entfernt sind, mit einer Genauigkeit von etwa zehn Mikrobogensekunden zu untersuchen und somit die allgemeine Relativitätstheorie im Grenzfall starker Felder zu testen. Zu den wissenschaftlichen Hauptinteressen des MPIA zählen eine ausführliche Studie junger massereicher Starburst-Sternhaufen mit dem Ziel einer präzisen Massenbestimmung der massereichsten Sterne, die Untersuchung der Sternhaufendynamik und die Suche nach Schwarzen Löchern mittlerer Masse, die sich in den Zentren dieser Sternhaufen verbergen sollten. Darüber hinaus planen wir die Suche nach Planeten bei Sternen sehr geringer Masse in der Sonnenumgebung.

*Wolfgang Brandner, Stefan Hippler,
Ralf-Rainer Rohloff, Rainer Lenzen*

IV.3 Instrumente für den Calar Alto

PANIC

Eine Weitfeld-Kamera für das nahe Infrarot wurde von den Astronomen sowohl am MPIA wie auch am IAA als das meistgewünschte neue Instrument für den Calar Alto genannt. Solch ein Instrument bietet, auch wenn es nicht das erste seiner Art ist, viele Anwendungsmöglichkeiten, von Untersuchungen des Sonnensystems bis zur Kosmologie. Da die Überbuchung des 3.5-m-Teleskops im Normalfall höher ist als die des 2.2-m-Teleskops, wurde beschlossen, PANIC, eine »Panoramic Near Infrared Camera«, für das 2.2-m-Teleskop zu bauen.

Die derzeit verfügbaren Detektoren haben eine Größe von 2048×2048 Pixeln. Man entschied sich, eine Anordnung aus vier Detektoren zu verwenden, um das verfügbare Sichtfeld zu vergrößern. Die Abdeckung eines Gesichtsfeldes von $0.5 \text{ Grad} \times 0.5 \text{ Grad}$ führt hierbei zu einem Bildmaßstab von $0.45 \text{ Bogensekunden} / \text{Pixel}$. Diese Detektoren lassen sich mit einer Lücke von nur 167 Pixeln zusammenfügen – damit wird PANIC eine sehr komfortable Struktur haben.

Dieses Instrument wird mit einer reinen Linsenoptik mit zehn Linsen in acht Gruppen ausgestattet. Die Bildqualität wird wie üblich definiert: 80 Prozent eingeschlossene Energie in zwei Pixeln über das gesamte Sichtfeld und für alle Wellenlängen. Der Spektralbereich erstreckt sich von 0.8 bis 2.5 Mikrometer und beinhaltet somit das optische Z-Band.

Die Anordnung ist in Abb. IV.3.2 zu erkennen. Das Instrument ist Längen- und Gewichtsbeschränkungen unterworfen, deshalb ist erstens eine Faltung des optischen Weges über drei Spiegel erforderlich; zweitens ist der Kryostat extrem leicht gebaut. Die Kühlung wird durch flüssigen Stickstoff erzielt. Die Haltezeit der Temperatur

bei einer 30-Liter-Füllung wird auf 34 Stunden geschätzt. Ein zweiter kleiner Flüssigstickstofftank wird ausschließlich für die Kühlung des Detektors verwendet. Das konische Stahlelement verbindet das gesamte Instrument mit dem Teleskop. Das Gewicht beträgt nur 15 kg und die Biegung lediglich 10 Mikrometer.

Alle optischen Elemente werden auf eine optische Bank montiert, um Durchbiegungen zu minimieren. Dies ist sehr wichtig, da die Optik geringe mechanische Toleranzen erfordert – typischerweise im Bereich von 50 Mikrometer. Die Finite-Elemente-Analyse hat gezeigt, dass die Durchbiegung der Bank nur in den extremsten Fällen diesen Wert um einen geringen Faktor überschreitet.

Wir haben vier Filterräder mit je sechs Positionen vorgesehen, sodass wir 20 Filter unterbringen können. Das optische Konzept ermöglicht darüber hinaus die Nutzung von Ein-Prozent-Filtern.

Die verwendeten Detektoren ermöglichen zudem die Nachführung in einem kleinen Unterfenster auf dem Chip. Dies ist erforderlich, da die standardmäßige Nachführungseinheit des Teleskops einen Teil des Sichtfeldes verdecken würde und daher nicht in Kombination mit PANIC verwendet werden kann.

Die Ausleseelektronik besteht aus der neuesten Version der Standard-Ausleseelektronik des MPIA. Die vier Detektoren werden gleichzeitig in 128 Kanälen abgelesen, auch ein Schnellauslesemodus ist integriert.

Um die Beobachter zu unterstützen, wird die einfache Eingabe von Informationen zur Einrichtung des Instruments und Durchführung der Beobachtung möglich sein. Ein Schnellansichtssystem mit Online-Datenreduktion ermöglicht die Beurteilung der Qualität der erhaltenen Daten. Die Daten werden automatisch gespeichert.

Der gewählte Abbildungsmaßstab eignet sich hervorragend für Durchmusterungen, aber nicht für Studien, die eine hohe räumliche Auflösung erfordern. Wir haben die Möglichkeit geprüft, eine zweite Pixelgröße von

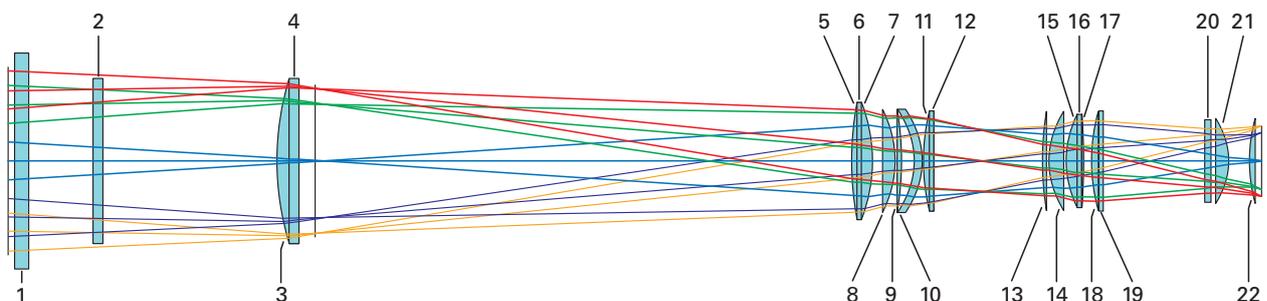


Abb. IV.3.1: Das optische PANIC-System. Die Gesamtlänge beträgt 180 cm und erfordert eine faltbare Konstruktion.

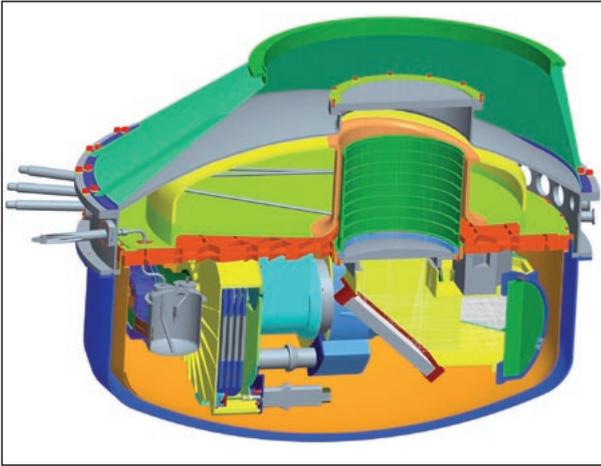
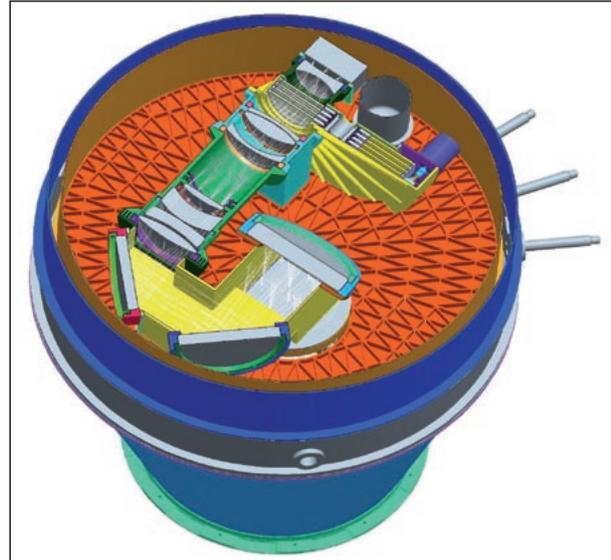


Abb. IV.3.2: Das PANIC-Konzept. *Oben:* Licht tritt von oben in den Kryostaten ein. Drei Spiegel falten den Lichtweg zu einem kompakten Verlauf. Der Durchmesser des Kryostaten beträgt ca. 100 cm. Alle optischen Elemente sind auf eine optische Bank (*rot*) montiert, um die Durchbiegung zu minimieren. *Rechts:* Blick auf die optische Bank mit den Faltspiegeln, der Linsenoptik und den Filterrädern (*gelb*).



0.25 Bogensekunden/Pixel durch Austausch von Teilen der Optik und Montage der entsprechenden Linsen auf einem motorisierten Rad bereitzustellen. Allerdings würde das Instrument mit der erforderlichen zusätzlichen Optik und der Mechanik die Gewichtsbeschränkung am 2.2-m-Teleskop überschreiten. Glücklicherweise haben Berechnungen ergeben, dass PANIC auch an dem 3.5-m-Teleskop mit einem Pixelmaßstab von 0.22 Bogensekunden / Pixel verwendet werden kann. Das Instrument kann daher sowohl am 2.2-m-Teleskop für Beobachtungen, die ein großes Gesichtsfeld erfordern, als auch am 3.5-m-Teleskop für Beobachtungen, die eine höhere Auflösung erfordern, genutzt werden.

*Josef Fried
in Zusammenarbeit mit IAA, Granada*

Die neue Steuerung des 3.5-m-Teleskops

Das Konzept der Teleskopsteuerung des 3.5-m-Teleskops geht auf die 70er Jahre zurück, die Hardware selbst ist fast ebenso alt und an der Grenze seiner Lebensdauer angelangt. Ein Ersatz von defekten Bauteilen wurde zunehmend schwierig, weil sich mittlerweile die Technologie stark gewandelt hat, so dass viele Bauteile, nicht mehr erhältlich sind, auch keine äquivalenten Typen. Um rein technisch bedingte Ausfälle an wertvoller Beobachtungszeit zu vermeiden, wurde die Steuerung des Teleskops komplett erneuert. Es wurde dabei ein vollständig neues System mit modernen, digitalen Bausteinen realisiert.

Die Teleskopsteuerung kontrolliert die Antriebe des Teleskops in Stunde und Deklination, die Rotation des Cassegrainflansches und den Fokusantrieb. Der Teleskoprechner besteht nicht mehr wie früher aus einem einzigen Rechner, dessen Bus sich über das ganze Teleskopgebäude erstreckt, um mit den einzelnen zu kontrollierenden Antrieben zu kommunizieren, sondern aus insgesamt fünf VME-Rechnern, die den Antrieben zugeordnet sind. Sie sind über ein eigenes Ethernet mit einem Zentralrechner vernetzt. Kommerziell erhältliche digitale, hochintegrierte intelligente Bausteine kontrollieren und regeln die einzelnen Antriebe. Die alte, weitgehend analoge Hardware wurde somit durch moderne hochintegrierte und intelligente digitale Elektronik ersetzt.

Da sehr hohe Genauigkeitsanforderungen an ein solches Kontrollsystem bestehen, sind die erforderlichen Regelkreise komplex. So besteht zum Beispiel der komplizierteste und wichtigste Antrieb, der Stundenantrieb, aus drei ineinander geschachtelten Regelkreisen. Diese Strukturen, die von der Firma Carl Zeiss in Versuchen ermittelt wurden, wurden im neuen Konzept in vereinfachter Form beibehalten, so dass sehr viel Entwicklungszeit gespart werden konnte.

Nach zwei Jahren Betriebsdauer zeigt sich, dass das Konzept der neuen Steuerung ausgezeichnet ist. Das Computersystem läuft über Monate hinweg problemlos, und die eingesetzten Bausteine haben bislang noch keine Ausfälle erlitten.

Ein wichtiges Kriterium einer Teleskopsteuerung ist neben der Zuverlässigkeit natürlich die erreichte Genauigkeit. Auch hier hat sich eine Verbesserung ergeben: Bei der ursprünglichen Steuerung betrug die rms-Abweichung von der Sollposition 0.15 Bogensekunden, bei der neuen Steuerung nur noch 0.1 Bogensekunden.

*Josef Fried, Karl Zimmermann, Rainer Wolf
in Zusammenarbeit mit Kollegen des Calar Alto*

IV.4 LAIWO – der Large Area Imager für das Wise Observatorium

Das MPIA, die Universität von Tel Aviv und das Institut für Astrophysik in Göttingen initiierten das von den drei Instituten und der deutsch-israelischen Stiftung finanzierte Programm »Giant Transiting Planets Observations« (GITPO) zur Suche nach extrasolaren Planeten der Größe des Jupiter bei (im I-Band) 14 bis 15 mag hellen Sternen.

Die Transit- oder Bedeckungs-Methode besteht aus der Suche nach einem vorübergehenden Helligkeitsabfall des zentralen Sterns, wenn sein Planet vor ihm vorbeiwandert. Die Beobachtungsstrategie unseres Projekts besteht in der ständigen Überwachung von drei Feldern, bis von ihnen 3000 Bilder aufgenommen sind. Wir gehen davon aus, dass wir an 15 Tagen pro Monat über einen Zeitraum von drei Jahren eine Himmelsfläche von insgesamt 30 Quadratgrad abdecken können. Die Beobachtungen werden mit dem 1.2-m-MONET-Teleskop in Texas (USA)

Abb. IV.4.1: Ansicht des LAIWO Dewar-Gefäßes.

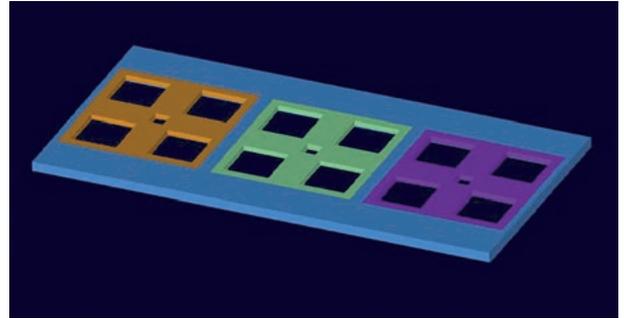
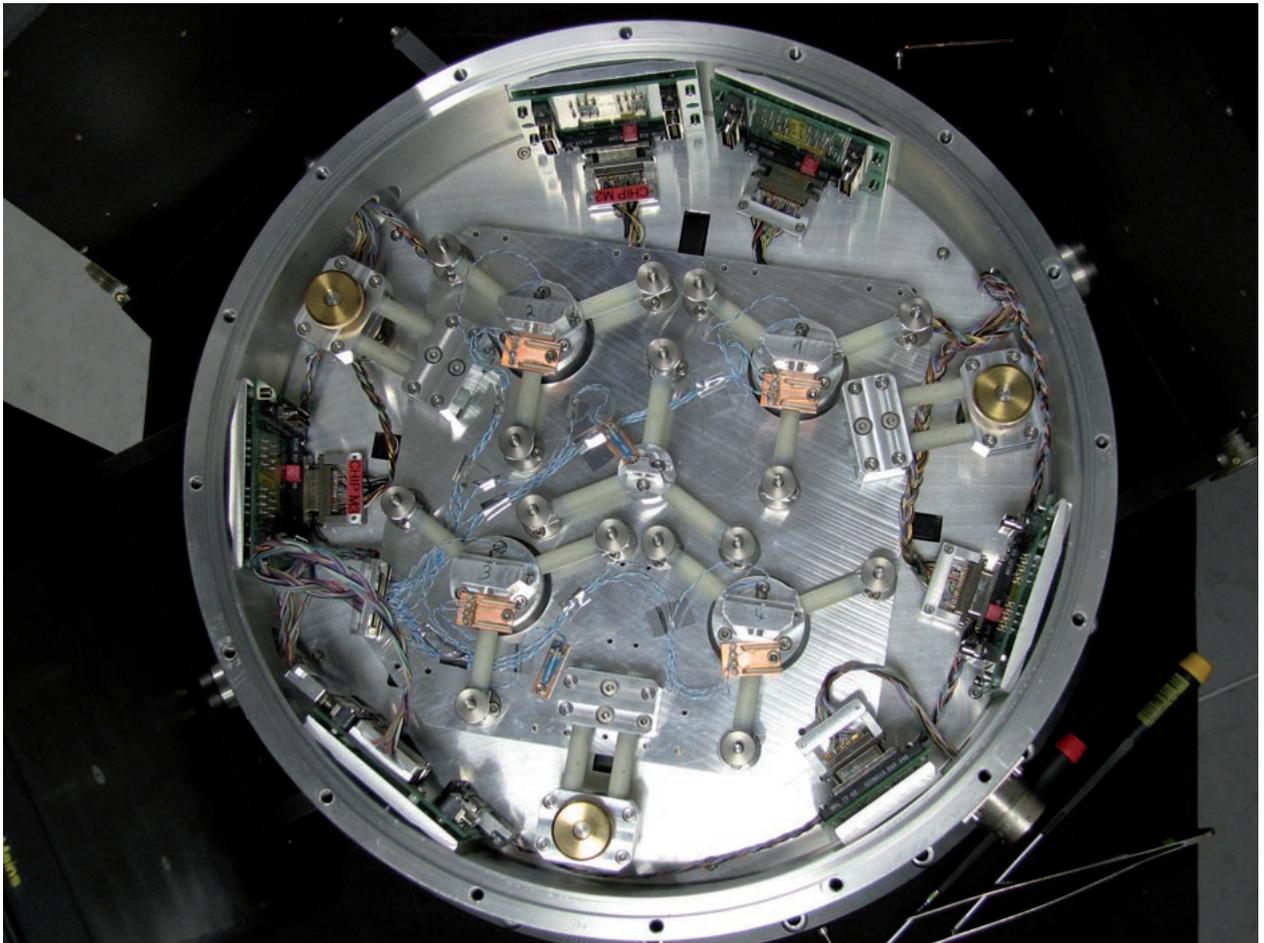


Abb. IV.4.2: Der Filterregler.

koordiniert, das von der Universität Göttingen betrieben wird. Das Netzwerk dieser beiden Teleskope erhöht die Anzahl der Messungen und damit auch die Anzahl der entdeckten Planeten. Es wird erwartet, dass im Verlauf der dreijährigen Beobachtungskampagne Dutzende extrasolarer Planeten im Transit entdeckt werden.

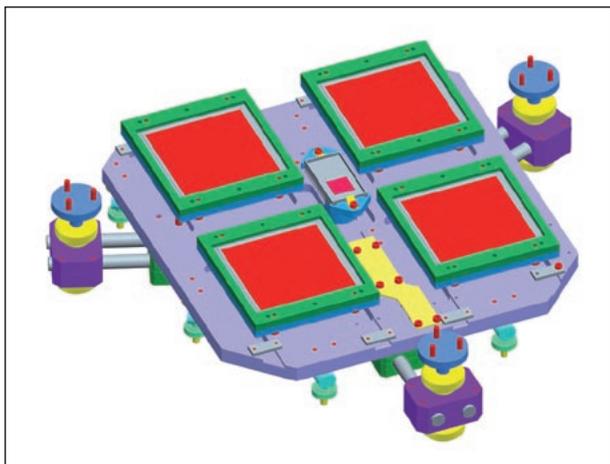


Abb. IV.4.3: Das CCD-Mosaik des LAIWO-Detektors.

Das MPIA baute in diesem Zusammenhang eine Weitfeldkamera für das Wise Observatorium (LAIWO, Large Area Imager for the Wise Observatory, siehe Abb. IV.4.1) mit einem Gesichtsfeld von einem Quadratgrad. Die Kamera besteht aus vier von vorne beleuchteten Lockheed CCD - 486-Detektoren mit jeweils 4000×4000 Pixeln und einer Pixelgröße von 15 Mikrometern und ist in zwei Segmente unterteilt: Das erste Segment besteht aus einem mit flüssigem Stickstoff gefüllten kryogenen Tank zur Kühlung der CCDs mit dem Dewar-Gefäß, das die CCDs enthält, und dem Eingangsfenster auf der Oberseite. Das zweite Segment besteht aus dem Filterschieber mit dem darin befindlichen Regler, in dem drei separate Platten mit Filtersätzen (Johnson B, V, R, Cousins I und Sloan z') gleichzeitig montiert werden können (siehe Abb. IV.4.2). Jede Platte kann fünf Filter aufnehmen – vier für die Wissenschafts-CCDs und eine für das Nachführungs-CCD. Das Nachführungs-CCD, ein e2V CCD47-20-frame-transfer-Typ mit 1000×1000 Pixel, jeweils mit einer Größe von 13 Mikrometern, befindet sich in der Mitte des von den vier Wissenschafts-CCD umgebenen Mosaiks (siehe Abb. IV.4.3).

Die Kamera wurde im September 2007 fertiggestellt und nach Israel geliefert. Im Oktober begaben sich Wissenschaftler und technische Mitarbeiter des MPIA in die Negev-Wüste, um die Kamera an dem 1-m-Teleskop im Wise-Observatorium zu installieren (siehe Abb. IV.4.4). Die Installation verlief fehlerfrei, aber die Inbetriebnahme ging aufgrund des häufigen schlechten Wetters langsam vor sich. Nach unserer Rückkehr wurden die Beobachtungen von den israelischen Kollegen T. Mazeh, Avi Shporer und den technischen Mitarbeitern des Wise-Observatoriums fortgesetzt, als die nachfolgend beschriebenen ersten ernsthaften Probleme auftraten.

Die CCDs werden im 16-Kanal-Modus ausgelesen, d.h. jedes CCD wird in vier Quadranten aufgeteilt. Die Beobachtungen werden an 15 Tagen im Monat durchge-



Abb. IV.4.4: Das Wise-Teleskop.

führt. Dies impliziert, dass die Kamera regelmäßig abmontiert werden muss, um Platz für andere Instrumente des Wise-Observatoriums zu schaffen. Nach dem ersten Abbau und dem anschließenden Wiedereinbau der LAIWO-Kamera schien ein CCD-Quadrant tot zu sein und ein weiterer erlosch kurz darauf, ebenso wie zwei weitere Quadranten während des nächsten Beobachtungslaufs. Daraufhin wurde entschieden, jeden weiteren Betrieb einzustellen, das Problem weiter zu untersuchen und zum Wise-Observatorium in Israel zurückzukehren, um weitere Tests vor Ort durchzuführen. In der Zwischenzeit und nach Kontaktaufnahme mit dem CCD-Hersteller, um mögliche Ursachen für die unerwarteten Vorfälle zu finden, entdeckte man, dass eine spezielle Ein- und Abschaltsequenz eingehalten werden musste, die dem MPIA zum Zeitpunkt des Kaufs nicht mitgeteilt worden war. Der Hersteller übermittelte die Information, dass die Nichteinhaltung dieser Sequenz den CCDs einen irreparablen Schaden zufügen könnte, leider zu spät.

Cristina Afonso und Ralf Klein reisten ein weiteres Mal nach Israel, um weitere Tests durchzuführen und den Zustand der verbliebenen CCDs zu ermitteln, die während des letzten Beobachtungslaufs noch funktionsbereit waren. Hierbei wurde festgestellt, dass keine der CCDs mehr reagierten. Man entschied sich daraufhin, die Kamera zurück nach Heidelberg zu schicken und neue CCD zu erwerben. Die Kamera wird hoffentlich Mitte 2009 wieder betriebsbereit sein, denn wir alle sind sehr begierig, mit der Jagd nach extrasolaren Planeten zu beginnen und weitere Jupiter zu entdecken!

*Cristina Afonso (SciM), Florian Briegel,
Thomas Henning (PI), Ralf Klein,
Karl-Heinz Marien (PM)
in Zusammenarbeit mit
den Universitäten Göttingen und Tel Aviv*

IV.5. Instrumente für Weltraumobservatorien

PACS – Fern-Infrarot-Kamera und Spektrometer für HERSCHEL

Das MPIA beteiligt sich mit einem Konsortium aus 15 europäischen Instituten an der Entwicklung des PACS-Instruments – einer Kombination aus Kameras und Spektrometern für Wellenlängen von 60 bis 210 μm für das Weltraumobservatorium HERSCHEL, das im Februar 2009 starten soll.

Als größtes Co-I-Institut des europäischen PACS-Konsortiums liefert das MPIA den Fokalebene-Chopper, erstellt die Spezifikationen der großen Ge:Ga-Spektrometer-Kameras und ihrer kalten Ausleseelektronik (-270°C), untersucht die Strahlungsschäden dieser Komponenten und beteiligt sich an der Kalibration des Instruments vor und während des Fluges.

Mit der Lieferung des generalüberholten Chopper-Qualifizierungsmodells und seiner Implementierung in die Ersatzeinheit des PACS-Experiments endete im Jahr 2007 die Hardware-Lieferung aus Heidelberg. Die Labormessungen an den Ge:Ga-Detektoren wurden fortgesetzt, um ihren Betrieb während des Fluges zu optimieren. Diese Messungen umfassen die Spezifizierung des Übergangsverhaltens nach Flussänderungen und die Empfindlichkeit unter ionisierender Strahlung.

Das MPIA-Team konzentriert sich jetzt auf die Spezifikation und Kalibrierung der PACS-Fluginstrumente am Boden und den Aufbau des Instrumentenkontrollzentrums (ICC). Hierbei stehen für das MPIA-ICC-Team insbesondere die Optimierung der Chopper-Leistung sowie die Leistungsanalyse der instrumenteninternen Kalibrierungsquellen und die »gestressten« Ge:Ga-Systeme sowie die gekühlte Ausleseelektronik im Vordergrund.

Abb. IV.5.1: Integration des generalüberholten Chopper-Qualifizierungsmodells in das PACS-Flug-Ersatzinstrument im Reinraum bei Kayser-Threde in München.



Abb. IV.5.2: Die Mitglieder des MPIA-ICC-Teams Helmut Dannerbauer und Markus Nielbock vor der Steuerkonsole im PACS-Betriebsraum des MPE während der Ausführung eines Testskripts für PACS-Fluginstrumente.

Darüber hinaus hat das MPIA-Team wesentlich zur Aufstellung des allgemeinen Plans für die Kalibration am Boden beigetragen. Das MPIA-Team beteiligt sich ebenfalls an der Entwicklung der allgemeinen interaktiven und Pipeline-Analyse und Dokumentation, und erstellt die speziellen Verfahren zur Kalibrationsanalyse für die Bodentests. Die Ergebnisse wurden in ca. 50 Testberichten zur Information des gesamten ICC-Teams, des PACS-Konsortiums und der ESA sowie als Referenz für die späteren Tests während des Fluges dokumentiert. Nach der Lieferung an die ESA wurde das PACS-Flugmodell im Sommer in den HERSCHEL-Flug-Kryostaten bei ASTRIUM in Friedrichshafen integriert. Im Herbst begann das MPIA mit der Koordination der Entwicklung des PACS-Leistungsprüfplans, der die erste wichtige Flugphase abdeckt, und legte die erste Flug-Kalibrierung des Instruments fest.

Zwei unter Leitung des MPIA geplante »Key projects« mit garantierter Beobachtungszeit (GT) in Bezug auf das staubige junge Universum und die frühesten Phasen der Sternentstehung haben die Prüfung des HERSCHEL-Zeitteilungsausschusses erfolgreich bestanden. Darüber hinaus beteiligt sich Heidelberg an drei anderen wichtigen GT-Projekten und ist an einer Reihe bedeutender Open-Time-Programme beteiligt, die eine Vielzahl astrophysikalischer Themen abdecken. Die Entscheidung über die Zeitteilung für diese Programme wird im Januar 2008 erwartet.

*Oliver Krause, Ulrich Klaas,
Jeroen Bouwman, Helmut Dannerbauer,
Ulrich Grözinger, Thomas Henning,
Markus Nielbock, Jürgen Schreiber, Jutta Stegmaier*

Kryogene Radmechanismen für die Instrumente MIRI und NIRSPEC an Bord des JWST

Das MPIA ist als einziges europäisches Institut an der Entwicklung von zwei der vier wissenschaftlichen Instrumente für das James Webb Space Telescope (JWST) beteiligt. Das Institut entwickelt in enger Zusammenarbeit mit C. ZEISS (Oberkochen) die Filter und Giterrad-Mechanismen für MIRI und NIRSPEC – die kryomechanischen Herzstücke, die die vollständige Funktion dieser komplexen Instrumente gewährleisten. Neben den Hardware-Beiträgen ist das MPIA auch für die Elektronik des MIRI-Instruments verantwortlich. Mitglieder des Instituts sind intensiv mit den Bodentests an MIRI beschäftigt und darüber hinaus an den wissenschaftlichen Teams für MIRI und NIRSPEC beteiligt.

Das Infrarot-Weltraumobservatorium JWST wird gemeinsam von den US-amerikanischen, europäischen und kanadischen Weltraumbehörden entwickelt. Der 6,5-m-Spiegel des Observatoriums ermöglicht die Aufnahme von Bildern, deren Schärfe den mit dem kleineren HUBBLE-Spiegel im optischen Bereich aufgenommenen Bildern entspricht. Um eine Blendung der empfindlichen Kameras durch ihre eigene Wärmestrahlung zu vermeiden, wird der Primärspiegel auf -230 °C strahlungsgekühlt. Diese »passive Kühlung« ist am Lagrange-Punkt L_2 (etwa 1,5 Millionen km in antisolarer Richtung) möglich. Die NASA hat die Gesamtverantwortung für die JWST-Mission, die 2013 an Bord einer ARIANE-5-Rakete starten wird.

Das JWST ist mit vier wissenschaftlichen Instrumenten ausgestattet, von denen zwei hauptsächlich in Europa gebaut werden: MIRI, eine Kamera mit Koronagraph und

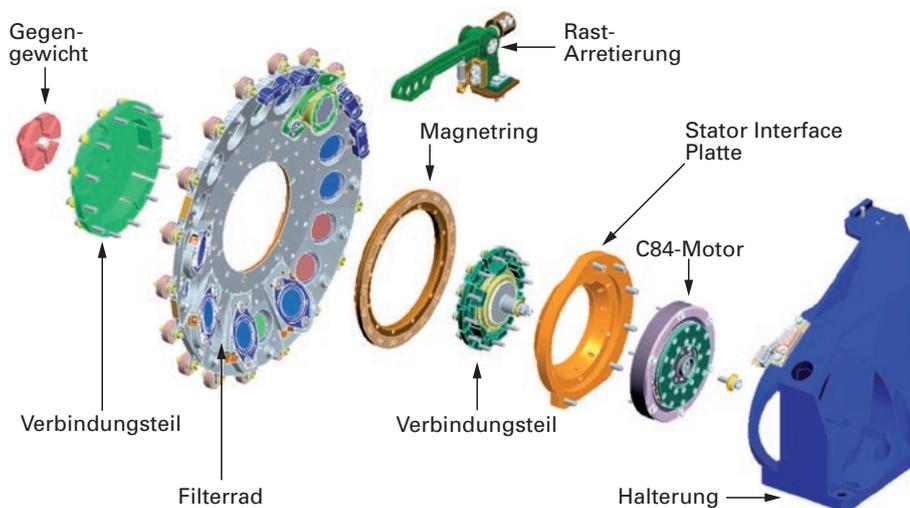
Spektrometer für den mittleren Infrarotbereich (5 bis $28\text{ }\mu\text{m}$), wird von einem Konsortium aus 20 europäischen Instituten gebaut, wobei JPL die Detektoren und die kryomechanische Kühlung liefert. NIRSPEC, ein Nahinfrarot-Multiobjektspektrograph (1 bis $5\text{ }\mu\text{m}$), der in der Lage ist, mehr als 100 Objekte gleichzeitig zu beobachten, wird von der ESA und einem von EADS-ASTRIUM (Deutschland) angeführten Industriekonsortium gebaut.

Alle Fokalebene-Instrumente müssen in einem Kryovakuum bei Temperaturen zwischen -267 °C (MIRI) und -240 °C (NIRSPEC) betrieben werden, damit ihre eigene Wärmestrahlung die kosmische Infrarotstrahlung nicht überlagert. Beide Instrumente enthalten große optische Wechselräder mit zahlreichen Gittern, Filtern, Strahlteilern, Spiegeln, Prismen und koronographischen Masken. Obwohl jeder Weltraumtechniker versucht, Mechanismen mit Rädern zu vermeiden (...Fehlfunktionen sind möglich...), sind leistungsfähige wissenschaftliche Instrumente ohne bewegliche Teile nicht herstellbar. Dank früherer erfolgreicher Entwicklungen von solchen Mechanismen für die europäischen Weltraumteleskope ISO und HERSCHEL war unser Institut gut auf die hochriskanten Herausforderungen vorbereitet und beteiligte sich an der Entwicklung der Radmechanismen für MIRI und NIRSPEC, die noch höhere Anforderungen stellen als die vorherigen Missionen.

Die Radmechanismen des JWST basieren auf einem Ratschenprinzip (siehe Abb. IV.5.3): Auf dem Umfang des Rades sind kleine Kugellager montiert, deren Anzahl der Menge optischer Elemente entspricht. Ein keilförmiges Element auf einem beweglichen Hebel rastet zwischen zwei Kugellagern ein und bestimmt so die Position des Rades mit einer Wiederholpräzision

Abb. IV.5.3: Der Filterrad-Mechanismus für MIRI, das Instrument für das mittlere Infrarot. Das Rad trägt Filter, koronographische Masken und ein Doppelprisma, und wird von einem zentralen Drehmomentmotor bewegt. Die Positionierung er-

folgt durch eine Rast-Arretierung im äußeren Laufring des Führungslagers. Der Mechanismus hat einen Durchmesser von 28 cm und ein Gesamtgewicht von 3 kg.



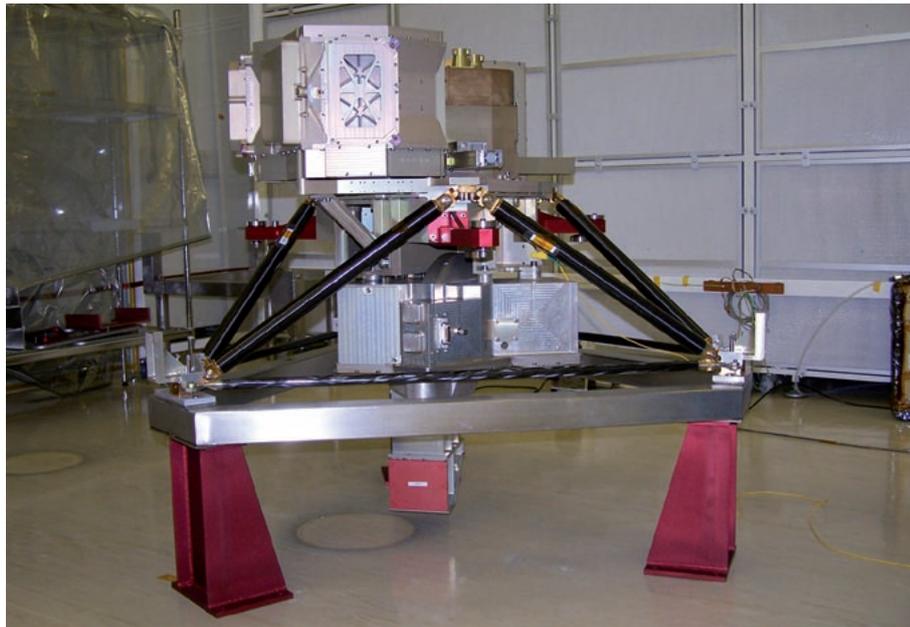


Abb. IV.5.4: Prüfmodell des MIRI-Instruments nach der Integration bei Rutherford Appleton Labs. Dies ist das erste funktionelle Modell eines wissenschaftlichen JWST-Instruments. Das Instrument ist in einer sechsbeinigen

Kohlefaser-Struktur aufgehängt und wärmeisoliert. Die Spektrometereinheit befindet sich oben im Bild. Unter dem Bilderfassungsabschnitt ist die optische Eingangskette zu erkennen.

von etwa einer Bogensekunde. Der zentrale Motor ist ein Drehmomentmotor ohne Getriebe. Die genaue Positionierung erfolgt mechanisch ohne Strom durch die Federtorsion des Ratschensystems. Das Antriebskonzept vermeidet die Rückkopplung durch einen elektrischen Positionssensor und Stromverluste, da die Positionierung rein mechanisch und mit hoher Zuverlässigkeit erfolgt.

Nach der erfolgreichen kritischen Designprüfung (Critical Design Review, CDR) des optischen MIRI-Systems arbeiten das MPIA und C. ZEISS derzeit an den Qualifizierungsmodellen des MIRI-Radmechanismus. NIRSPEC hinkt dem Terminplan ein wenig hinterher. Die Erstellung aller erforderlichen Dokumentationen entsprechend den Weltraumanforderungen für den Radmechanismus-CDR von NIRSPEC begann 2007. Während das MPIA sich als Auftragnehmer von C. ZEISS an der Entwicklung der Gitter- und Filterräder für NIRSPEC beteiligt und für die Entwicklung der elektrischen Komponenten (Motoren, Positionssensoren, Kryo-Kabelbaum) verantwortlich ist, ist die Aufgabenverteilung für MIRI umgekehrt: Hier baut C. ZEISS die Flug-Hardware als gewerblicher Auftragnehmer des MPIA.

Um technologische Risiken in Verbindung mit dem Entwicklungsprogramm der Mechanismen zu mindern und Kosten zu senken, wurden am MPIA vor den Qualifikationsmodellen Prototypen gebaut und getestet. Diese Prototypen wurden in das MIRI-Testmodell – das erste wissenschaftlich repräsentative Modell eines JWST-Instruments (Abb. IV.5.4) – integriert und ermöglichten eine erste Leistungsanalyse. Die erste umfassende kryogene Testphase im Jahr 2007 war sehr erfolgreich: Alle Subsysteme arbeiteten ohne größere Probleme und bestätigten den Eindruck, dass die Entwicklung des Flugmodells auf einem guten Weg ist.

*Oliver Krause, Ralph Hofferbert,
Friedrich Müller, Thomas Henning,
Dietrich Lemke, Ulrich Grözinger,
Armin Huber, Armin Böhm,
Monica Ebert, Karl Wagner,
Stefan Meister, José Ricardo Ramos,
Ralf-Rainer Rohloff, Silvia Scheithauer,
Thomas Blümchen, Tobias Junginger,
Stephan Birkmann, Matthias Alter*

V Menschen und Ereignisse

V.1 Tagungen, Vorträge, Führungen und mehr

Das Jahr 2007 brachte dem MPIA nicht nur eine Reihe wissenschaftlicher Glanzpunkte, sondern auch zahlreiche Veranstaltungen unterschiedlicher Art. Neben einer Reihe von Fachtagungen gehören mittlerweile auch öffentliche Vorträge, Führungen, Veranstaltungen für Schüler und Studenten zum Alltag des Instituts.

Astronomen forschen und leben nicht mehr im Elfenbeinturm. Sowohl der persönliche Austausch unter Fachleuten als auch die Darstellung wissenschaftlicher Ergebnisse in der Öffentlichkeit haben an Bedeutung gewonnen: Anschaulich aufbereitete Präsentationen der Forschungsergebnisse sorgen für eine breite Aufmerksamkeit der Bevölkerung und für lebhaftes Interesse von Seiten der Schülerinnen und Schülern.

Tagungen und Sommerschulen

Unter dem Titel *Galaxy Growth in a Dark Universe* veranstaltete das MPIA gemeinsam mit dem Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH) vom 16. bis 20. Juli eine internationale Konferenz, zu der etwa 200 namhafte Astrophysiker aus aller Welt in das Heidelberger Kongresshaus kamen. In fast 70 Vorträgen präsentierten und diskutierten die Astronomen ihre neuesten Ergebnisse und Theorien zur Entstehung und Entwicklung der Galaxien. Seit der Entdeckung der Dunklen Materie und der Erkenntnis, dass nahezu alle Galaxien in ihren Zentren supermassereiche Schwarze Löcher beherbergen, deren Masse zudem mit derjenigen der Galaxien korreliert ist, hat dieses Forschungsgebiet innerhalb der Astronomie wieder enorm an Spannung gewonnen. So scheint die Entstehung der Galaxien im jungen Universum eng mit der Bildung der zentralen Schwarzen Löcher verknüpft zu sein. Auf welche Weise dies geschah, ist noch weitgehend unverstanden und war Gegenstand intensiver Diskussionen zwischen Beobachtern und Theoretikern.

Die enge Verknüpfung von Beobachtung und Theorie wird auch im Titel einer anderen großen Konferenz deutlich, die das MPIA zwischen dem 10. und 14. September im Heidelberger Kongresszentrum veranstaltete: *Massive Star Formation: Observations Confront Theory*. Zur Zeit werden verschiedene Konzepte der Entstehung massereicher Sterne diskutiert, die durch Beobachtungen zu

überprüfen sind. In dieser Hinsicht eröffnen sich mit dem Large Binocular Telescope (LBT), das ab dem Frühjahr 2008 mit beiden Spiegeln arbeiten soll, sowie mit den zukünftigen Observatorien ALMA und HERSCHEL ganz neue Möglichkeiten.

Der große Fortschritt beim LBT führte zu ersten wissenschaftlichen Arbeiten, die zum Teil auch in diesen Jahresbericht eingegangen sind, und zu deren Erstautoren auch Astronomen des MPIA gehören (siehe Kapitel II.5). Das Engagement des Instituts beim LBT äußerte sich zudem in der Veranstaltung des *LBT-Board-Meetings* Mitte Mai am MPIA.

Die Inbetriebnahme von Teleskopen der 10-m-Klasse bedeutet nicht automatisch das Aus für die ehemaligen Großteleskope mit Spiegeldurchmessern von 2 bis 4 Metern. Diese Teleskope haben nach wie vor ihren Platz, zum Teil in ganz eigenen Einsatzgebieten, wie etwa den großen und zeitaufwendigen Himmelsdurchmusterungen. Dies gilt auch für das Calar-Alto-Observatorium, über dessen wissenschaftliche Ergebnisse die zahlreichen Teilnehmern des *Calar-Alto-Kolloquiums* vom 2. bis 3. Mai am MPIA berichteten.

In den beiden vom MPIA organisierten Konferenzen im Tagungsschloss Ringberg der MPG am Tegernsee ging es zum einen vom 20. bis 26. Mai unter dem Titel *The Impact of AGN Feedback on Galaxy Formation* um den Zusammenhang zwischen der Aktivität von Galaxien und ihrer Entstehung. Ein halbes Jahr später stand ein anderes hoch aktuelles Thema auf der Agenda: *Astronomy with Laser Guide Star Adaptive Optics*. Immer mehr Teleskope können mit von künstlichen Lasersternen unterstützter adaptiver Optik nahe an der Beugungsgrenze betrieben werden. Die damit erreichte Steigerung der Empfindlichkeit und Bildschärfe ermöglicht Beobachtungen, die bis vor kurzem noch undenkbar waren und der beobachtenden Astronomie neue Fenster öffnen.

Um den Studenten eine optimale Ausbildung zu ermöglichen, hat die MPG die International Max Planck Research Schools (IMPRS) gegründet. Seit 2005 leitet das MPIA die »IMPRS for Astronomy and Cosmic Physics at the University of Heidelberg« (s. Jahresbericht 2005, Kap. V.4). Im Berichtsjahr führte das MPIA in Heidelberg die *IMPRS Summerschool 2007: The Milky way Galaxy* durch. Zudem fand in Dorio, Italien mit dem *4th MPIA Student Workshop* eine weitere große Veranstaltung speziell für Studenten statt.

Öffentlichkeitsarbeit

Wann immer es möglich ist, versucht das MPIA seine wissenschaftlichen Veranstaltungen mit Öffentlichkeitsarbeit zu verbinden. So erschien beispielsweise parallel zur Galaxy-Growth-Tagung eine von insgesamt zehn Pressemitteilungen dieses Jahres, und es wurde eine *Pressekonferenz* einberufen.

Auch Führungen durch das MPIA erfreuen sich nach wie vor großer Begeisterung. Neben den IMPRS-Studenten, Schulklassen und anderen Gruppen gab es auch einige spezielle Führungen für prominente Gäste. So besuchte beispielsweise im November eine Gruppe um den Heidelberger Bürgermeister Dr. Gerner das Institut. Ab Mitte des Jahres konnten wir die Gäste durch unser *neu gestaltetes Treppenhaus* führen. Die Attraktion sind hier große, rückseitig durchleuchtete astronomische Schaubilder, die alle direkten Bezug zu Projekten des Instituts haben. Viele Informationen können die Gäste auch einer *neu gestalteten Institutsbroschüre* entnehmen, deren Herstellung einige unserer Partner in der Wirtschaft dankenswerterweise unterstützt haben. Die Broschüre ergänzt unsere bereits vorhandenen »Handouts« wie den Jahresbericht und das recht ausführliche Faltblatt.

Einer der Höhepunkte der öffentlichen Veranstaltungen war die Beteiligung des Instituts an der *Nacht der Wissenschaft*. Auf diese von mehreren tausend Menschen besuchte Veranstaltung gehen wir im folgenden Abschnitt näher ein. Ein weiterer Höhepunkt war aber erneut auch unsere im Jahr zuvor gestartete Vortragsreihe *Astronomie am Sonntag Vormittag*. Bei jedem der acht Vorträge gab es wieder ein volles Haus mit insgesamt fast tausend Besuchern. Auf sehr gute Resonanz stießen auch wieder die *populärwissenschaftlichen Vorträge* einiger

Mitarbeiter in Schulen, Planetarien oder bei anderen externen Veranstaltungen. Im Berichtsjahr startete auch eine neue Vortragsreihe unter dem Titel *Astronomie in Heidelberg*, die in den Wintermonaten im Planetarium Mannheim stattfindet. Forscher und Forscherinnen aus allen fünf astronomischen Instituten Heidelbergs tragen dort vor, unser Institut beteiligt sich an der Organisation.

Auch das von der am MPIA herausgegebenen Zeitschrift *Sterne und Weltraum* initiierte und von der Klaus Tschira Stiftung großzügig geförderte Schulprojekt *Wissenschaft in die Schulen!* (siehe Jahresbericht 2005, Kapitel V.10) wurde weiter vorangetrieben. Seit 2006 richtet es sich nicht mehr nur an die Schüler der Ober- sondern auch an die der Mittelstufe. Zusammen mit den Führungen für Schulklassen, dem in diesem Jahr gleich zweimal durchgeführten Schülerpraktikum zur Berufsorientierung an Gymnasien (BOGY) sowie unserer Teilnahme am Girls' Day ist das MPIA weiterhin sehr präsent bei den jungen Menschen. Damit dies auch so bleiben soll, wurde im Mai ein erstes Arbeitstreffen zum *Jahr der Astronomie 2009* veranstaltet, zu dem das MPIA Gäste von Instituten des Rates Deutscher Sternwarten eingeladen hatte.

Das Jahr 2007 war für das MPIA sehr erfolgreich, das gilt sowohl für die wissenschaftlich Fortschritte als auch für die öffentlichen Veranstaltungen und anderen Aktivitäten. Dies war nur möglich, weil sich erneut viele Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sehr engagiert für das Institut eingesetzt haben. Dies ist besonders zu erwähnen, da im Oktober 2007 auch der *Fachbeirat* zu Gast war, um eine vergleichende Evaluierung des MPIA durchzuführen. Auch dieses für das Institut so wichtige Ereignis endete mit einem sehr guten Erfolg.

Klaus Jäger

V.2 Die »Nacht der Wissenschaft«

Am 10. November 2007 fand erstmals in der Rhein-Neckar-Region die *Nacht der Wissenschaft* statt. Ähnlich wie bei der schon seit Jahren etablierten *Langen Nacht der Museen* öffneten in Heidelberg, Mannheim und Ludwigshafen mehr als hundert Institute und Firmen ihre Tore für die Öffentlichkeit. Das MPIA und die Landessternwarte waren wieder besondere Attraktionen: Allein rund 4000 von insgesamt geschätzten 23 000 Teilnehmern fanden den Weg auf den Königstuhl.

Die Astronomie ist und bleibt eine Wissenschaft mit großer Faszination in der breiten Bevölkerung. Davon zeugt nach dem *Tag der offenen Tür* am MPIA im Jahr 2005 und der Teilnahme des Instituts an der *Langen Nacht der Museen* 2006 nun auch der Erfolg der dritten Großveranstaltung innerhalb kurzer Zeit.

Am 10. November 2007 präsentierten sich das MPIA und die Landessternwarte der Öffentlichkeit von 18 Uhr abends bis 2 Uhr nachts mit einem abwechslungsreichen Programm. Der große Besucheransturm ist bemerkenswert, denn wegen der langen An- und Abfahrt mussten viele Gäste auf die Teilnahme bei manch anderer Veranstaltung verzichten. Auch das schlechte Wetter mit zeitweise strömendem Regen war offenbar kein Hinderungsgrund, die beiden astronomischen Institute zu besuchen.

An insgesamt 28 auf beide Institute verteilten Stationen konnten sich die Besucher einen Überblick über die moderne astronomische Forschung verschaffen. Mit Vorträ-

gen, der Erläuterung von Exponaten und der Demonstration von Experimenten wurde über die wissenschaftlichen Hintergründe und technischen Herausforderungen berichtet. Instrumente für die aktuellen und zukünftigen erd- und weltraumgebundenen Großteleskope, aber auch die Funktionsweise der Teleskope vor Ort wurden erläutert. Filme wurden gezeigt und zum Teil live kommentiert. Auch für die jüngsten Besucher war gesorgt: Ein spezielles Kinderprogramm an der Landessternwarte ließ sie die Faszination des Universums erleben.

Einer der Hauptanziehungspunkte war die Vortragsreihe im großen Hörsaal des MPIA. In zehn Vorträgen wurde über Schwarze Löcher, ferne Galaxien, extrasolare Planeten und die Suche nach Leben im All berichtet. Selbst beim letzten Vortrag, der erst nach ein Uhr nachts begann, war der Hörsaal noch bestens gefüllt. Große Aufmerksamkeit erregten gleich mehrere Stationen, die sich mit dem Large Binocular Telescope befassen. Auch praktische Demonstrationen, beispielsweise zur Infrarotbeobachtung, adaptiven Optik, Datenanalyse oder zur weltraumgebundenen Beobachtung, wurden mit großem Interesse verfolgt.

Ein weiterer Publikumsmagnet war die Station des MPI für Kernphysik, an dem man sich mit Hochenergie-

Abb. V.2.1: Drangvolle Enge herrschte im MPIA während der *Nacht der Wissenschaft*, bei der die Nachfrage nach Infomaterial wie gewohnt stark war.





Abb. V.2.2: Auch komplexe Techniken, wie Interferometrie, ließen sich die wissbegierigen Besucher gerne erklären.

astrophysik beschäftigte. Wegen laufender Baumaßnahmen konnte das MPIK das eigene Gebäude nicht für das Publikum öffnen. Kurzerhand entschloss man sich, im MPIA als Gast aufzutreten.

Auch für reichlich Informationsmaterial zum Mitnehmen war gesorgt, und jeder Besucher konnte T-Shirts, Tassen oder Poster mit astronomischen Motiven erstehen. Natürlich wurde auch für das leibliche Wohl der Gäste gesorgt.

Abb. V.2.3: Selbst beim letzten Vortrag, der erst nach ein Uhr nachts begann, war der Hörsaal noch bestens gefüllt.

Wie bei ähnlichen Veranstaltungen zuvor wurde der Erfolg der *Nacht der Wissenschaft* auf dem Königstuhl erst durch das Engagement zahlreicher Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter möglich – an einem Samstag Abend keine Selbstverständlichkeit. Auch die Unterstützung der lokalen Organisation durch die regionalen Veranstalter funktionierte sehr gut. So lief der Bustransfer von und nach Heidelberg perfekt. Und obwohl der Besucheransturm allen Beteiligten nur wenig Zeit zum Verschnaufen gab, war die Stimmung nach anstrengenden acht Stunden durchweg positiv.

Auch diesmal hatte sich der Aufwand gelohnt und die beteiligten Akteure hatten sehr viel Spaß bei der Veranstaltung.

Klaus Jäger



V.3 THISBES letzte Reise

In den 1970er Jahren unternahm das Heidelberger Ballonteleoskop THISBE insgesamt 17 Flüge in die Stratosphäre und beobachtete den Himmel im Infrarotbereich. Damit öffneten die Heidelberger Forscher ein neues Fenster ins Weltall. Im Juni 2007 trat das Gerät seine letzte Reise an: Es wurde vom MPIA auf dem Königstuhl in das Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim transportiert, wo es als »Originalgerät aus der Frühzeit der Weltraumastronomie« der Nachwelt erhalten bleibt.

Seit seiner Gründung engagierte sich das MPIA in der extraterrestrischen Forschung. Insbesondere der damit verbundene frühzeitige Einstieg in die Infrarotastronomie war für die gesamte spätere Entwicklung des Instituts von großer Bedeutung. Neben zwei Photometern für die beiden Sonnensonden Helios 1 und 2 (Start 1974 und 1976) wurde parallel bei der Firma Dornier und in den Werkstätten des Instituts unter der Leitung von Dietrich Lemke die Ballongondel THISBE (Telescope of Heidelberg for Infrared Studies by Balloon-borne Experiments) entwickelt und gebaut. Zur damaligen Zeit boten Beobachtungen mit einem ballongetragenen Teleskop die einzige Möglichkeit, Himmelskörper im infraroten und ultravioletten Spektralbereich zu beobachten.

Mit einem Höhenforschungsballon ist es möglich, Teleskope und Ausrüstung mit bis zu 400 Kilogramm Gewicht bis in 40 Kilometer Höhe zu tragen. Dort liegen 99,7 Prozent der gesamten Atmosphäre unterhalb des Ballons, und damit werden Beobachtungen im mittleren Ultraviolett und im Infraroten möglich. Vier Teleskope mit Öffnungen von 6 bis 20 Zentimetern wurden in den Werkstätten des MPIA gebaut und kamen auf THISBE zum Einsatz.

Im September 1969 stieg THISBE von Meppen im Emsland aus zum ersten Mal in die Stratosphäre auf – damals noch zu Erprobungsflügen. An einem 50000 Kubikmeter großen, wasserstoffgefüllten Plastikballon erreichte das Instrument eine Höhe von 29 Kilometern und landete nach zweieinhalbstündigem Flug am Fallschirm in der Lüneburger Heide.

Das gesamte Flugprogramm mit einer Länge von bis zu zehn Stunden war auf einem Lochstreifen gespeichert und lief, von einer Quarzuhr gesteuert, vollautomatisch ab. In der Bodenstation wurden die Messdaten zur Echtzeit-Verfolgung auf Schreibern aufgezeichnet und für die Endauswertung auf Magnetbändern gespeichert.

Die meisten Flüge erfolgten in den 1970er Jahren mit heliumgefüllten Ballons in Texas, die ersten beiden im Herbst 1971. Nach bis zu zehn Stunden Beobachtungszeit in der Stratosphäre landete das Ballonteleoskop an einem Fallschirm und konnte geborgen werden. Die

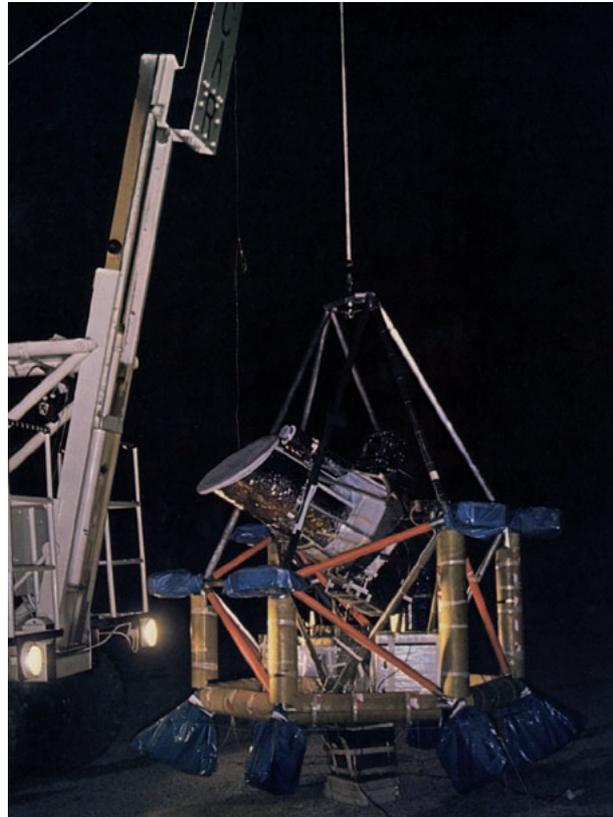


Abb. V.3.1: Die Ballongondel THISBE und das mit Trockeneis gekühlte Infrarotteleskop zur Beobachtung bei 2,4 und 3,5 μm Wellenlänge kurz vor dem Start am 12. August 1974 auf der Startbasis für wissenschaftliche Ballonflüge in Palestine, Texas.

Landung wurde in dünn besiedelte Gebiete viele hundert Kilometer vom Startort entfernt verlegt. Viele dieser Bergungen aus schlangenreichen Sumpfgeländen im amerikanischen Südosten wurden zu wahren Abenteuern für die Heidelberger Wissenschaftler. Der letzte Flug wurde im Juli 1980 von Oberpfaffenhofen aus gestartet.

Wissenschaftlich besonders hervorzuheben sind die erste Beobachtung des Zentralgebietes der Milchstraße bei 2,4 μm Wellenlänge, Beobachtungen des Zodiakallichts und die Messung des Airglow, einer Emission des OH-Radikals in der hohen Atmosphäre. Im Zentralgebiet unserer Milchstraße, das durch interstellaren Staub verdunkelt ist, wurde die intensive Infrarotstrahlung von Milliarden von Sternen, meist kühler als unsere Sonne, kartiert. Aus den Ultraviolett- und Infrarotmessungen des Zodiakallichts, das bei der Streuung des Sonnenlichtes an interplanetaren Staubteilchen entsteht, folgten Informationen zur



Abb. V.3.2: Die Verladung des Ballonteleskops in das Fahrzeug des Landesmuseums für Technik und Arbeit im Juni 2007 am MPIA auf dem Heidelberger Königstuhl. *V.l.n.r.:* Klaus Barth, Restaurator des Museums, Dietrich Lemke, damals THISBE-Projektleiter, Wilfried Hofmann, der vor 30 Jahren mit THISBE-Messungen promovierte, und Thomas Kosche, Sammlungsleiter des Museums. (Foto: S. Kresin, Rhein-Neckar-Zeitung).

Größenverteilung der Staubpartikel. In einer Lücke im Emissionsspektrum des OH-Airglows wurde die kosmische Nachthimmelshelligkeit gemessen, eine wichtige Größe in den theoretischen Entwicklungsmodellen der Galaxien seit ihrer Entstehung.

Die Erfahrung mit THISBE gab den Ausschlag dafür, dass sich das MPIA in den 1980er Jahren am Bau von

Infrarotinstrumenten für Satelliten beteiligte. THISBE war eine ausgezeichnete Vorbereitung für die Kamera ISOPHOT, die bis 1998 sehr erfolgreich in dem Europäischen Infrarotsatelliten ISO arbeitete. Mit ISOPHOT wurde erstmals das ferne Infrarot bis $240\ \mu\text{m}$ Wellenlänge erschlossen. Diese langwellige Strahlung wird von sehr kalten kosmischen Quellen mit etwa -240 Grad Celsius ausgesandt. Es folgte eine bedeutende Beteiligung am PACS-Instrument für das Europäische Weltraumteleskop HERSCHEL, das im kommenden Jahr gestartet wird. Bei der Entwicklung von zwei Infrarot-Instrumenten für das zukünftige James-Webb-Weltraumteleskop, den Nachfolger von HUBBLE, nimmt das MPIA in Europa eine führende Rolle ein.

Dietrich Lemke

V.4 Ehrungen, Preise und eine Berufung

Heinz Maier-Leibnitz-Preis für Eric Bell

Im Jahr 2007 vergab die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) zum 30. Mal an Nachwuchswissenschaftler den mit je 16 000 Euro dotierten Heinz Maier-Leibnitz-Preis. Bei der Festveranstaltung am 5. Juni wurde neben fünf weiteren Preisträgern Eric Bell vom MPIA geehrt. Die Deutsche Forschungs-Gemeinschaft würdigte damit seine »Versuche zu klären, wie Galaxien aus den Anfangsfluktuationen nach dem Urknall entstanden sind.« Die Laudatio betonte, dass »Herr Bell sich durch eine geschickte Kombination von sorgfältigen Modellierungsvorarbeiten, der Einbeziehung einer Vielfalt von Daten aus verschiedenen Wellenlängenbereichen und neuen kosmologischen Beobachtungen eine internationale Führungsrolle verschaffen« konnte.

Eric Bell studierte Physik und Astronomie an der Universität Glasgow und erhielt seinen Dokortitel an der Universität Durham (UK). Anschließend arbeitete er auf einer Postdoc-Stelle als wissenschaftlicher Assistent an der Universität von Arizona. Im Jahre 2002 kam er ans MPIA, wo er das European Union Research Training Network »Spectroscopic and Imaging Surveys for Cosmology« initiierte. Im Jahr 2006 gründete Eric Bell im Rahmen des Emmy-Noether-Programms der DFG eine Nachwuchsgruppe, die sich mit der Entwicklung großer Galaxien befasst.

Die Entwicklung von Galaxien über einen kosmologisch langen Zeitraum hinweg lässt sich beispielsweise an Hand der Gesamtmasse und der Leuchtkraft verfol-

gen. Allerdings ist die gemessene Helligkeit nur ein unzureichender Indikator für die gesamte stellare Masse. Der Grund hierfür ist, dass junge Sterne eine viel größere Lichtmenge pro stellarer Masseneinheit ausstrahlen als alte. Dies hat beispielsweise zur Folge, dass zwei Galaxien mit derselben stellaren Masse sich in ihrer Lichtstärke um mehr als den Faktor Zehn unterscheiden können.

Eric Bell hat eine Methode entwickelt, mit der sich die stellare Masse in Galaxien mit einer Unsicherheit von 30 Prozent ermitteln lässt. Hierfür ist es nötig, die Galaxien in verschiedenen Spektralbereichen aufzunehmen. Diese Methode und daraus entwickelte Verfahren sind sehr rasch zum Standard in der Astronomie geworden.

Mit diesem neuen Verfahren konnten moderne Fragestellungen überprüft werden. So wurde vermutet, dass massereiche Galaxien durch Verschmelzen mit anderen Galaxien beständig gewachsen sind. Unklar ist jedoch, ob dieser Vorgang bis heute fortgedauert hat, oder ob sich massereiche Galaxien bereits vor langer Zeit vollständig gebildet haben und bis zur heutigen Zeit stetig gealtert sind. Eric Bell und seine Kollegen konnten den Nachweis erbringen, dass die massereichsten Galaxien während der letzten acht Milliarden Jahre keine neuen Sterne mehr gebildet haben (das heutige Weltalter wird zu 13.7 Milliarden Jahre angenommen). Andererseits erbrachten die Untersuchungen, dass die Zahl dieser massereichen Galaxien heute wesentlich größer ist als vor acht Milliarden Jahren.

Die wachsende Anzahl massereicher Galaxien in der »zweiten Evolutionshälfte« des Universums ist von entscheidender Bedeutung. Nach gegenwärtigen Theorien ist das Wachstum durch Verschmelzen insbesondere für die massereichsten Galaxien von Bedeutung und stellt eine unmittelbare Folge der Gravitationswirkung der Dunklen Materie dar. Bell vertritt die These, dass diese Erhöhung der Anzahl massereicher Galaxien vermutlich durch Galaxienverschmelzung bewirkt wird.

Zwei entscheidende Fragen sind nach wie vor offen und bilden den Schwerpunkt der weiteren Forschungen. Zunächst will Bell versuchen, ein genaues Verständnis der Rate der Galaxienverschmelzung zu gewinnen. Diese liefert Anhaltspunkte für die Verteilung der Dunklen Materie. Darüber hinaus sagen heutige Theorien vorher, dass Galaxien auch durch das Abkühlen von Gas wachsen



Abb. V.4.1: Eric Bell bei der Verleihung des Heinz-Maier-Leibnitz-Preises der DFG am 5. Juni in der Bundeskunsthalle in Bonn. Es gratulieren der DFG-Präsident Matthias Kleiner (rechts) und Bundesforschungsministerin Annette Schavan. (Photo: DFG)

können. Beobachtungen belegen dies nicht. Warum ist das so? Bell und Kollegen wollen die Eigenschaften der Population massereicher Galaxien mit Modellen der Galaxienbildung und -evolution vergleichen. Sie hoffen, auf diese Weise Erkenntnisse über die Bedingungen zu gewinnen, unter denen es zu einer Unterdrückung der Gasabkühlung kommt.

Ludwig-Biermann-Preis der Astronomischen Gesellschaft für Henrik Beuther

Seit 1989 verleiht die Astronomische Gesellschaft den mit 2500 Euro dotierten Ludwig-Biermann-Förderpreis. Die nach dem Gründer und ersten Direktor des Instituts für Astrophysik in Garching benannte Auszeichnung ist als Reisepatenschaft für hervorragende junge Astronomen gedacht. Im Jahre 2007 ging der Preis an Henrik Beuther für »seine wichtigen Beobachtungen und originellen Beiträge zum Verständnis der Entstehung massereicher Sterne.« Beuther hat als erster Heidelberger Astronom den renommierten Preis erhalten.

Henrik Beuther studierte an der Universität Köln Physik und promovierte am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn über Frühstadien der Entstehung massereicher Sterne. Anschließend arbeitete er dort sowie als Emmy-Noether-Fellow der DFG am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (USA) als Postdoc. Seit September 2005 leitet er am MPIA eine Emmy-Noether-Gruppe, die vorwiegend die Frühphasen der Entstehung massereicher Sterne studiert. Auf diesem Forschungsgebiet sind noch viele Fragen offen. Beispielsweise ist nach wie vor unverständlich, ob die massereichsten Sterne durch ähnliche Akkretionsvorgänge wie massearme Sterne entstehen, oder ob hier andere Prozesse, wie das Verschmelzen von Protosternen, wichtig werden.

Henrik Beuther geht diese Fragen aus verschiedenen Richtungen an und richtet sein Augenmerk auf folgende Punkte: Welche Eigenschaften besitzen massereiche Akkretionsscheiben, welchen Einfluss hat die anfängliche Fragmentation massereicher Sternentstehungsregionen, was für eine Staub- und Gaschemie spielt sich in den



Abb. V.4.2: Ludwig-Biermann-Preisträger Henrik-Beuther.

Sternentstehungsgebieten ab, und welche Rolle spielen Ausfluss und Einfall von Gas für den Stern beziehungsweise seine zirkumstellare Scheibe? Im Jahre 2006 hatte Beuther insbesondere durch seine Beobachtungen von Akkretionsscheiben massereicher, junger Sterne Aufmerksamkeit erregt (siehe Jahresbericht 2006, S. 32).

»Mit einer eindrucksvollen Liste von Veröffentlichungen, bei denen Henrik überwiegend als Erstautor auftritt, ist er international hoch angesehen«, heißt es in der Laudatio, die der AG-Präsident Gerhard Hensler bei der Verleihung verlas. »Mit dem Ludwig-Biermann-Förderpreis hofft die Astronomische Gesellschaft, einen kleinen Beitrag zu Henriks Zukunft leisten zu können. Vorrangig aber unterstreicht sie damit die Exzellenz seiner Forschung«, so Hensler.

Ernst-Patzer-Preis für Anders Johansen, Boris Häussler und Konrad Tristram

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 zu fördern und zu unterstützen. Sie vergibt ihre Förderpreise an junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am MPIA. Ausgezeichnet werden die besten referierten Veröffentlichungen eines Nachwuchswissenschaftlers oder einer Nachwuchswissenschaftlerin während der Promotions- und/oder der Postdoc-Phase. Die Begutachtung der eingereichten Vorschläge erfolgt durch ein Auswahlgremium, das sich aus zwei Wissenschaftlern des MPIA sowie einem externen Wissenschaftler zusammensetzt. Die drei Laureaten des Jahres 2007 erhielten jeweils 2000 Euro.

Anders Johansen wurde für seine Arbeit »Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks« (Johansen et al., Nature 448, 1022, 2007) ausgezeichnet (siehe Kap. II.3). Johansen beschreibt hierin ein neues Szenario für die Bildung von Planetesimalen und Kleinplaneten aus kleinen Gesteinsbrocken. Johansen zeigte, dass das gravitative Zusammenwachsen von Gesteinsbrocken in turbulenten Wirbeln in den Scheiben stark beschleunigt ablaufen kann.

Die Berechnung der Bewegung solcher Brocken in turbulenten Akkretionsscheiben gelingt durch den Einsatz einer neuen Software. Johansen war maßgeblich an der Weiterentwicklung des Pencil-Codes beteiligt, der die magnetohydrodynamischen Gleichungen auf dem numerischen Gitter für ein Gas löst, das mit kleineren Teilchen

wechselwirken kann. Erst dank seiner Neuentwicklung eines Parallel-Solvers ist es gelungen, das gravitative Zusammenwachsen der Staubbrocken quantitativ zu erfassen. Diese Arbeit eröffnet neue Möglichkeiten im Verständnis der Bildung von Planetesimalen und Kleinplaneten.

Boris Häussler erhielt den Patzer-Preis für seine Arbeit »GEMS: Galaxy fitting catalogues and testing parametric galaxy fitting codes: GALFIT, GIM2D« (Häussler et al., Astrophysical Journal). Er hat in seiner Arbeit ein für das Studium der kosmologischen Entwicklung von Galaxien äußerst wichtiges technisches Problem aufgegriffen: die systematische Untersuchung verschiedener Algorithmen zur Analyse von Galaxienbildern auf CCD-Aufnahmen des Weltraumteleskops HUBBLE. Ohne diese Untersuchung ließe sich nicht verstehen, ob die beobachtete Entwicklung in den Galaxienpopulationen real ist oder ob es sich um Auswahl- und Analyseeffekte handelt. Mit seiner systematischen Untersuchung hat Häussler das technische Fundament geschaffen, auf dem die wissenschaftlichen Studien zur Galaxienentwicklung im Rahmen des internationalen Projekts GEMS (Galaxy Evolution from Morphologies and Spectral Energy Distributions) aufbauen.

Seine Publikation ist das Ergebnis einer sehr aufwändigen Arbeit und systematischer Herangehensweise. Es werden auch praktische Hinweise zur Datenanalyse gegeben, die für andere auf diesem Gebiet arbeitende Wissenschaftler sehr hilfreich sein werden.

Konrad Tristram wird für seine Arbeit »Resolving the complex structure of the dust torus in the active nucleus of the Circinus galaxy« (Tristram et al., Astronomy and

Abb. V.4.3a–c: Die Gewinner des Ernst-Patzer-Preises: Anders Johansen, Boris Häussler und Konrad Tristram (v.l.n.r.).



Astrophysics, im Druck) ausgezeichnet. In seiner Arbeit präsentiert er die erste direkte Messung des lange postulierten Torus aus heißem Staub, der einen aktiven galaktischen Kern in der nahen Seyfert-2-Galaxie im Sternbild Circinus umgibt. Um diese wichtige Information über die Struktur der Staubverteilung zu erhalten wurde die neuartige interferometrische Beobachtungsmethode im mittleren Infrarot benutzt. Insbesondere die erfolgreiche Beobachtung vieler unterschiedlicher Basislinien des Very Large Telescope Interferometers in Kombination mit dem Instrument MIDI stellt einen Durchbruch dieser Methode dar. MIDI wurde unter Leitung des MPIA entwickelt und gebaut.

Für die Interpretation dieser exzellenten Daten wurde eine neue Modellierungsmethode entwickelt. Sie ermöglichte es, den vollen Informationsgehalt des Datensatzes auszuschöpfen. So ließ sich die räumliche Verteilung von zwei Staubkomponenten ermitteln. Außerdem fand Tristram Hinweise darauf, dass der Torus selbst keine homogene Struktur hat, sondern eher aus einzelnen Klumpen besteht. Das Ergebnis ist von größter Bedeutung für das Verständnis von aktiven galaktischen Kernen.

Tacchini-Preis der Italienischen Astronomischen Gesellschaft für Fabio Fontanot

Die Italienische Astronomische Gesellschaft verleiht den nach Pietro Tacchini (1838 – 1905) benannten Preis jährlich für die fünf besten italienischen Doktorarbeiten in der Physik. Tacchini war der Begründer der Vereinigung Italienischer Spektroskopiker (Societa degli Spettroscopisti Italiani). 2007 wurde Fabio Fontanot für seine Doktorarbeit »Multiwavelength approach to the joint formation and evolution of galaxies and AGN« ausgezeichnet.

Fabio Fontanot studierte an der Universität Triest Physik, wo er auch promovierte. Seit Mai 2006 beschäftigt er sich am MPIA als Postdoc mit entfernten Quasaren und der Entwicklung von AGN und massereichen Galaxien.

In seiner Doktorarbeit untersuchte er die gemeinsame Entwicklung aktiver galaktischer Kerne (AGN) und Galaxien, wobei er sowohl Beobachtungen als auch Modelle mit einbezog. Der experimentelle Teil seiner Arbeit beruht auf der Himmelsdurchmusterung



Abb. V.4.4: Tacchini-Preisträger Fabio Fontanot.

GOODS, die mit den Weltraumteleskopen SPITZER, HUBBLE, CHANDRA und XMM-NEWTON erhalten wurde. Dieser Datensatz diente zur Suche hochrotverschobener Quasare und zur Bestimmung ihrer Anzahldichte. Fontanot konnte zum Beispiel nachweisen, dass die Quasare bei Rotverschiebungen zwischen $z = 5.2$ und $z = 3.5$ nicht allein für die vollständige Ionisation des intergalaktischen Mediums verantwortlich sein können.

Im zweiten Teil seiner Arbeit präsentierte Fontanot ein neues Modell namens GALRISE, mit dem er die gemeinsame Entwicklung von Galaxien und AGN simulieren konnte. Von entscheidender Bedeutung war hier die Einbeziehung von Rückkoppelungsmechanismen, wie die Akkretion von Materie auf ein supermassereiches Schwarzes Loch und die Entstehung eines Superwindes, der von der Strahlung des Schwarzen Lochs und Sternstrahlung angetrieben wird. Diese Entwicklungsszenarien können die Relation zwischen den Massen Schwarzer Löcher in den Zentren aktiver Galaxien und denen der umgebenden Stern-Bulges erklären.

Otto-Haxel-Preis der Universität Heidelberg für Benjamin Muster

Die Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg vergibt seit mehreren Jahren den Otto-Haxel-Preis. Sie zeichnet damit in jedem Semester jeweils eine hervorragende Diplomarbeit aus der theoretischen und experimentellen Physik aus. Im Jahr 2007 erhielt Benjamin Muster vom MPIA den mit 500 Euro dotierten Preis für seine Untersuchung von Galaxienhalos und der Haufenbildung von Galaxien bei hohen Rotverschiebungen.

Ziel der Arbeit war die Untersuchung einer Beziehung zwischen der stellaren Masse von Galaxien und den Massen der Halos aus Dunkler Materie, in denen sich diese befinden. Muster ging dieses Problem mit N-Körper-Simulationen an. Die Ergebnisse für die Relationen der Stern- zu Halomassen verglich er dann mit semianalytischen Rechnungen. Die Ergebnisse gaben die Beobachtungsdaten aus dem SDSS sehr gut wieder. Daraufhin wurde die Stern-Halo-Massenrelation verwendet, um Vorhersagen für weiter entfernte Galaxien abzuleiten. Eines der Ergebnisse ist, dass das Verhältnis der Masse in den Sternen einer Galaxie zur Masse des umgebenden Halo zu größeren Rotverschiebungen hin abnehmen sollte. Anders gesagt: Die Dunkle-Materie-Halos dominierten die Gesamtmassen der Galaxien in der Frühzeit des Universums stärker als heute.

Abb. V.4.5: Otto-Haxel-Preisträger Benjamin Muster.



Sebastian Wolf nimmt einen Ruf an die Universität Kiel an

Im Berichtsjahr erhielt Sebastian Wolf einen Ruf auf eine W2-Professur an die Universität Kiel. Wolf will sich dort der Stern- und Planetenentstehung widmen. Der Schwerpunkt seiner Forschung liegt auf der numerischen Simulation und der Beobachtung zirkumstellare Scheiben.

Sebastian Wolf war ab 1997 an der Thüringischen Landessternwarte Tautenburg beschäftigt. Dort entwickelte er eine Methode, mit der sich der Strahlungstransport in beliebigen Staubkonfigurationen dreidimensional besonders leicht und schnell numerisch behandeln lässt. Gleichzeitig beobachtete er bei der Eso auf La Silla zirkumstellare Scheiben in Doppelsternen. Im Rahmen seiner Promotion wandte er dann die theoretischen Modelle unter anderem auch auf diese Staubscheiben an und traf Vorhersagen für die Polarisation des gestreuten Sternlichts. In dieser Zeit sammelte er also sowohl in der Theorie als auch in der Beobachtung Erfahrung, was bei seiner jetzigen Berufung von großem Vorteil war.

Nach Forschungsaufenthalten am MPIA, dem Jet Propulsion Laboratory, wo er an einem Legacy Program des Weltraumteleskops SPITZER beteiligt war, und dem California Institute of Technology kam er im Januar 2004 als erster Leiter einer Emmy-Noether-Gruppe an das MPIA. Die DFG förderte vier Jahre lang seine Arbeitsgruppe, zu der ein Doktorand und ein Postdoc gehörten. Neben der Vertiefung der Studien zu protoplanetaren Scheiben unter Anwendung räumlich hochauflösender

Abb. V.4.6: Sebastian Wolf vor dem Gebäude des MPIA.



Beobachtungsmethoden hat er als Projektwissenschaftler das internationale Interferometrieprojekt MATISSE mit auf den Weg gebracht (s. Kap. IV.2)

Im Rahmen des Emmy-Noether-Programms soll der Stipendiat auch die »Befähigung zum Hochschullehrer« erlangen, wie es bei der DFG heißt. Diese Chance hat Sebastian Wolf genutzt: Seit Januar 2008 ist er Professor an der Universität Kiel.

Markus Pössel erhält den Hanno und Ruth Roelin-Preis für Wissenschaftspublizistik

Auf der Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft 2007 in Würzburg erhielt Markus Pössel vom Max-Planck-Institut für Gravitationsforschung (Albert Einstein Institut) in Golm den mit 3000 Euro dotierten Roelin-Preis für Wissenschaftspublizistik. Der Preis wird alle zwei Jahre vom Max-Planck-Institut für Astronomie vergeben; die Auswahl trifft eine Jury aus Wissenschaftlern und Wissenschaftspublizisten.

Mit dem Hanno und Ruth Roelin-Preis wird ein Wissenschaftspublizist ausgezeichnet, der neue Erkenntnisse aus der Astronomie und Weltraumforschung einer breiten Öffentlichkeit besonders erfolgreich vermittelt hat (s. Jahresbericht 2005, Kap. V.11). Der 2007 geehrte Markus Pössel (geboren 1972) promovierte 2003 am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik zu dem Thema »Versteckte Symmetrien in fünfdimensionaler Supergravitation.« Dort arbeitete er zur Zeit der Preisverleihung als wissenschaftlicher Mitarbeiter mit Schwerpunkt Grundlagen und Vermittlung der Allgemeinen Relativitätstheorie. Derzeit ist er Senior Science Advisor bei dem World Science Festival, das Ende Mai 2008 in New York stattfinden wird.

Rechtzeitig zum Einstein-Jahr 2005 hatte Pössel die Idee eines allgemeinverständlichen Online-Portals zur Relativitätstheorie. »Einstein Online« hat sich seitdem zu einer breiten Plattform entwickelt, an der sich neben dem AEI weltweit 17 namhafte Universitäten und Forschungsinstitute beteiligen. Das Portal umfasst rund 500 Textseiten in Deutsch und Englisch und mehr als 200 Abbildungen und Animationen, die den Besuchern die Grundlagen und Anwendungen der Relativitätstheorie nahebringen. Es verzeichnete seit seiner Freischaltung im Januar 2005 bis Herbst 2007 weltweit mehr als 800 000 Besucher.



Abb. V.4.7: Markus Pössel

Gleichzeitig hat Markus Pössel in bedeutenden Zeitschriften und Zeitungen eine Vielzahl allgemeinverständlicher Texte zum Themenbereich Relativitätstheorie und Astrophysik verfasst, sowie das Buch »Das Einstein-Fenster – eine Reise in die Raumzeit«.

Und schließlich hat Markus Pössel für verschiedene Ausstellungen im Einstein-Jahr Texte verfasst und interaktive Experimente konzipiert. Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang seine Mitarbeit an der großen Ausstellung »Albert Einstein – Ingenieur des Universums«, die im Jahr 2005 in Berlin 130 000 Besucher anzog. Für diese Ausstellung war er an Konzeption, Planung und Umsetzung des Bereichs »Einsteins Welt heute«, in dem die aktuellen Entwicklungen der Relativitätstheorien Einsteins dargestellt wurden, maßgeblich beteiligt. Dafür schrieb er auch Ausstellungs- und Katalogtexte.

Die fachliche Kompetenz und die Breite dieses medialen Ansatzes gaben für die Jury den Ausschlag, den Hanno und Ruth Roelin-Preis 2007 für Wissenschaftspublizistik an Markus Pössel zu vergeben.

Jakob Staude

V.5 »Die Begeisterung eines Forschers überträgt sich auf die Studenten«

Ein Gespräch mit dem neuen auswärtigen wissenschaftlichen Mitglied Willy Benz

Der an der Universität Bern forschende und lehrende Prof. Willy Benz wurde im Jahre 2007 zum auswärtigen wissenschaftlichen Mitglied des MPIA berufen. Damit wurde eine schon seit langem bestehende Partnerschaft zwischen ihm und den Heidelberger Astronomen auf eine offizielle Basis gestellt. In den kommenden Jahren will er sich insbesondere der Planetenentstehung widmen. In diesem Gespräch erläutert Benz seine Forschung, seine Einstellung zur Einheit von Forschung und Lehre und seine zukünftigen Pläne für die Zusammenarbeit mit dem MPIA.

Frage: Woran arbeiten Sie und Ihre Mitarbeiter?

WB: Im Physikalischen Institut der Universität Bern konzentrieren wir uns auf die Entstehung und Entwicklung von Planetensystemen, insbesondere unserem eigenen. Da gibt es auch eine Gruppe, die Messinstrumente für Raumsonden baut. Ein Instrumentenpaket aus Bern fliegt zum Beispiel auf der Kometenonde ROSETTA. Meine eigene Gruppe arbeitet dagegen theoretisch. Wir haben zum Beispiel viel über die Entstehung von extrasolaren Gasplaneten geforscht, sowie über die des Mondes. Dabei haben wir die Kollision der jungen Erde mit einem Körper von der Größe des Mars simuliert.

In jüngerer Zeit gehen Sie der Frage nach, ob auch Merkur in seiner Entstehungsphase Ziel eines solchen Treffers gewesen ist. Was hat Sie dazu bewogen?

WB: Merkur nimmt im Sonnensystem eine Sonderstellung ein, weil er zu 70 Prozent aus Eisen besteht. Einige Wissenschaftler erklären dies damit, dass ein Teil seines Gesteinsmantels wegen der Sonnennähe verdampft ist. Die Alternative, die wir untersuchen, geht davon aus, dass Merkur in einem frühen Stadium von einem großen Körper getroffen wurde und dabei einen Teil seines Mantels verloren hat. Interessanterweise machen beide Modelle unterschiedliche Vorhersagen über die chemische Zusammensetzung des Mantels. Deswegen sind wir auch sehr an den Ergebnissen der Merkursonden MESSENGER und BEPICOLOMBO interessiert. Schade ist natürlich, dass die ESA die anfangs geplante Landesonde bei BEPICOLOMBO aus Kostengründen gestrichen hat.

Sie sind zwar Theoretiker, aber vor kurzem erschienen Sie als Koautor auf einer viel beachteten Veröffentlichung von Michel Mayors Gruppe, die bei einem Stern drei Exoplaneten von der Größenordnung Neptuns entdeckt hatte. Wie kam es dazu?

WB: Ich habe bei Michel Mayor promoviert. Als Mayor über das Instrument HARPS nachdachte, habe ich ihm beim Schreiben des Antrags geholfen. Seitdem gehört Bern dem HARPS-Konsortium an.

HARPS ist ein hochauflösender Spektrograph, mit dem am 3.6-m-Teleskop der Eso auf La Silla nach Exoplaneten gesucht wird.

Richtig. Ende der 90er Jahre hatte in der Schweiz noch niemand für die Eso ein Instrument gebaut. Es gab dafür schlicht keine Finanzierungsmöglichkeit. HARPS hat also dazu gedient, in der Schweiz eine ganz neue Finanzierungslinie für astronomische Instrumente zu entwickeln. Dies war nur wegen des Erfolgs mit ELODIE möglich, mit dem Mayor und Queloz den allerersten Exoplaneten um den Stern 51 Pegasi, entdeckt hatten. Teile von HARPS haben wir in der Werkstatt meines Instituts in Bern gebaut. Ich selbst habe nie mit HARPS beobachtet, aber einer unserer Doktoranden war deswegen öfter in Chile.

Auf diese Weise sind Sie sowohl in die Erforschung der extrasolaren Planetensysteme als auch unseres eigenen Systems involviert.

WB: Für mich muss die Planetenforschung beide Aspekte beinhalten. Unser Sonnensystem können wir gewissermaßen unter der Lupe betrachten. Wir studieren die Planeten detailliert mit Teleskopen, schicken Sonden hin und holen zum Teil sogar Proben zur Erde. Das wird uns bei einem Exoplaneten nie gelingen. Hier können wir aber nur ein einziges System studieren. Es fehlt die Vielfalt. Wir wissen nicht, was alles möglich ist. Das erfahren wir erst durch das Studium der anderen Planetensysteme.

Mit welchen Methoden gehen Sie dabei vor?

WB: Mit Simulationen, für die wir Beobachtungsdaten als Eingangsgrößen verwenden. Das sind zum Beispiel die Massenverteilung und die Lebensdauer der zirkumstellaren Scheiben, die Metallizität der Sterne und anderes mehr. Damit schränken wir den Parameterraum für unsere Monte-Carlo-Simulationen ein. Dann lassen wir eine Million Mal die Entwicklung der Scheiben simulieren und erhalten daraus ebenso viele mögliche Planetenpopulationen. Die vergleichen wir mit den Beobachtungsdaten der bekannten Exoplaneten. Wir sind also heute so weit, dass wir statistische Vergleiche mit den Beobachtungen durchführen können. Aus solchen Analysen kann man zum Beispiel eine Liste von Sternen

ableiten, bei denen sich die Suche nach Exoplaneten besonders lohnt oder besonders aufschlussreiche Resultate bringen könnte.

Gemeinsame Interessen

Kommen wir nun auf Ihren neuen Status als auswärtiges wissenschaftliches Mitglied des MPIA zu sprechen. Was erhoffen Sie sich davon?

WB: Ich verfolge die Arbeiten am MPIA schon seit vielen Jahren, weil einige der dortigen Gruppen auf dem gleichen Gebiet arbeiten wie meine Gruppe in Bern. Ich erhoffe mir deshalb, dass wir uns wissenschaftlich ergänzen. Das ist auf vielen, hoch aktuellen Gebieten möglich. Vor allem natürlich bei der Entstehung und Entwicklung von Planeten.

Wie stellen Sie sich die zukünftige Kooperation konkret vor?

WB: Nun, zuerst einmal sind Bern und Heidelberg nicht sehr weit voneinander entfernt. Es gibt keine Visums- oder sonstige Einreiseformalitäten, die einen Austausch erschweren. Das erleichtert Vieles. Ich stelle mir unter anderem vor, dass wir Doktoranden und Postdocs für begrenzte Zeiten austauschen. Ich habe bereits mit einigen meiner Leute gesprochen. Die sind sehr ge-

spannt darauf. Umgekehrt können selbstverständlich auch Mitarbeiter des MPIA nach Bern kommen. Es kann für junge Leute sehr lehrreich sein, für ein paar Monate einmal eine andere Arbeitsweise, andere Methoden und Forschungsbedingungen kennen zu lernen. Das sollte ohne große formale Anstrengungen möglich sein.

Wollen Sie auch einmal selbst für längere Zeit ans MPIA kommen?

WB: Das habe ich noch nicht geklärt. Aber eine Möglichkeit, die mir vorschwebt, wäre ein Sabbatical. Dann würde ich für ein paar Monate nach Heidelberg kommen und mit den Kollegen hier an gemeinsamen Projekten arbeiten. Das muss ich natürlich auch mit meiner Familie abklären. Ich habe drei Kinder, davon sind noch zwei in der Schule. Aber wegen der räumlichen Nähe kann ich durchaus auch mal für ein paar Tage herkommen.

Wie vergleichen sich Ihrer Meinung nach Ihr Institut und das MPIA?

WB: Mein Institut gehört zur Universität, deren Mittel wesentlich eingeschränkter sind als die eines Max-Planck-Instituts. Dennoch schaffen wir es durchaus, Instrumente für eine Raumsonde wie ROSETTA zu bauen oder Theorien zu entwickeln. Obwohl Sachmittel immer wichtig sind, kommt es am Schluss trotzdem auf die richtigen Leute an, und darin sind die Universitäten schon konkurrenzfähig. Bei uns in der Schweiz sind vielleicht noch am ehesten die vom Bund finanzierten Eidgenössisch Technischen Hochschulen mit den Max-Planck-Instituten vergleichbar. Die ETHs haben grundsätzlich mehr Mittel als die Universitäten.

Was ich am MPIA auch sehr schätze, ist die Breite der Forschung. So kann ich hier Vorträge über Kosmologie hören, was ich sehr faszinierend finde. In den USA habe ich ja 14 Jahre lang Astrophysik gelehrt und auch ein wenig über Supernovae gearbeitet. Es ist nicht so, dass ich wieder in die astrophysikalische oder kosmologische Forschung einsteigen will, aber mein Interesse daran ist ungebrochen. In Bern fehlt mir das.

Die Einheit von Forschung und Lehre

Forschung und Lehre sind an den Universitäten eng miteinander verknüpft. Fänden Sie es vorteilhafter, wenn es hier eine klarere Trennung gäbe, etwa damit Wissenschaftler mehr Zeit für die Forschung haben?

WB: Nein, auf keinen Fall. Ich denke, wenn man die Studenten wirklich gut ausbilden will, dann braucht man Professoren, die ihren Stoff nicht nur aus Büchern kennen, sondern ihn auch aus ihrer aktuellen Forschung entnehmen.

Abb. V.5.1: Willy Benz



Also das alte Humboldtsche Prinzip der Einheit von Forschung und Lehre.

WB: Genau. Auch wenn jemand den Stoff noch so gut aus dem Buch vorträgt, ist die Begeisterung doch eine ganz andere, als wenn er selbst forscht. Und diese Begeisterung überträgt sich auf die Studenten. Das ist enorm wichtig. Deshalb ist es auch wichtig, dass die Max-Planck-Forscher auch in die Universitäten gehen und Seminare oder Vorlesungen halten. So kann man die Studenten für die Forschung allgemein und an den Max-Planck-Instituten im Besonderen interessieren.

In Heidelberg ist die Zusammenarbeit von Universitäts- und Max-Planck-Instituten durch die Gründung des Zentrums für Astronomie gefördert worden. Hier arbeiten jetzt drei Universitätsinstitute und zwei Max-Planck-Institute viel enger zusammen als zuvor.

WB: Das ist sehr gut, denn auf diese Weise kann man viele Studenten über den Köder Astronomie zum Physikstudium bringen. Natürlich werden längst nicht alle Absolventen der Astrophysik auch in der Forschung bleiben können. Aber Physiker werden doch immer benötigt. Hier sehen die Studenten, dass Astronomie ein modernes, dynamisches Gebiet ist, in dem viel passiert. Das interessiert die jungen Leute doch.

Bei uns in Bern regiert im Moment ein ganz anderer Trend. Hier studieren sehr viele Geographie. Das hört sich zunächst erstaunlich an. Der Grund dafür ist aber ganz einfach. In der Geographie ist die Klimaforschung angesiedelt, und die ist zurzeit modern. Nur, benötigen wir wirklich so viele Geographen?

Abschließend eine Einschätzung der zukünftigen Ausrichtung des MPIA. Sie wissen vielleicht, dass wir versuchen, einen dritten Direktor ans Institut zu holen. Welche Empfehlung würden Sie in dieser Hinsicht geben?

WB: Zunächst einmal: Die beiden jetzigen Direktoren sind wirklich top. Sie haben hervorragende Ideen, sie harmonisieren miteinander und haben das Institut auf einen tollen Stand gebracht. Wenn man sich für einen dritten Direktor entscheidet, sollte man auf ein ausgewogenes Wachstum achten. Wachstum als Selbstzweck ist nicht sinnvoll. Wenn der Aufbau einer dritten Abteilung zu Lasten von einer der beiden bestehenden Abteilungen ginge, würde ich das sehr bedauern.

Eine dritte Abteilung müsste auf jeden Fall eine Ergänzung ohne Verringerung der zwei bestehenden Abteilungen sein. Was hielten Sie von dem Gebiet Astrobiologie als drittes Standbein?

WB: Das wäre natürlich ein sehr aktuelles Forschungsgebiet, aber es ist auch stark interdisziplinär. Primär scheint es mir mehr biologisch-chemisch ausgerichtet zu sein, als astronomisch. Da muss man sich schon fragen, ob eine solche Gruppe hier am richtigen Platz wäre. Außerdem muss man sich fragen, ab wann wir mit Beobachtungsdaten, vor allem Spektren von Exoplaneten, rechnen können, die es zu analysieren gälte. In diesem Zusammenhang möchte ich daran erinnern, dass die ESA das Projekt DARWIN zur Untersuchung und spektroskopischen Charakterisierung von Exoplaneten verschoben hat. Im jetzigen Cosmic-Vision-Programm ist es nicht mehr enthalten, weswegen es vor 2020 nicht kommen wird.

Ich denke, auch die Entscheidung über eine dritte Direktorenstelle sollte eine Vision für die zukünftige Forschung am MPIA beinhalten. Die will gut überlegt sein.

*Das Interview führten
Jakob Staude und Thomas Bührke*

Willy Benz wurde am 6. Juli 1955 in Neuchâtel geboren, wo er Physik studierte. Im Jahre 1984 promovierte er in Astrophysik an der Universität Genf bei Michel Mayor, der 1995 zusammen mit Didier Queloz bei dem Stern 51 Pegasi den ersten extrasolaren Planeten entdeckt hat. Anschließend absolvierte Benz eine Postdoc-Ausbildung am Los Alamos National Laboratory (USA) und an der Harvard University, wo er später Assistant Professor wurde. In den Folgejahren lehrte er an der University of Arizona (USA) und an der Universität Genf. Seit 1997 ist Willy Benz Professor am Physikalischen Institut der Universität Bern, das er seit 2002 als geschäftsführender Direktor leitet.

Sein Engagement in Lehre und Forschung wurde 1988 mit dem Milton Fund Award und ein Jahr später mit dem Thomas Temple Hoopes Price for Excellence in

Undergraduate Teaching ausgezeichnet. Seit 2004 ist er Mitglied des Schweizerischen Wissenschafts- und Technologierates und seit 2005 korrespondierendes Mitglied der International Academy of Astronautics. Zudem ist er derzeit Mitglied der Schweizer Delegation im Science Programme Committee der Europäischen Weltraumorganisation ESA.

Sein Arbeitsgebiet ist die Entstehung und Entwicklung von Planetensystemen, wobei er sich insbesondere durch die Simulation von Kollisionen großer Körper in der Frühphase des Sonnensystems einen Namen machte.

Mehr über Willy Benz und seine Forschungsarbeit unter: www.space.unibe.ch/taps

V.6 »Ein klares Plädoyer für die Grundlagenforschung«

Ein Gespräch mit Ranga Yogeshwar

Ranga Yogeshwar ist bekannt als Redakteur und Moderator wissenschaftlicher Fernsehsendungen wie »Quarks & Co«. Das Herz des mit zahlreichen Preisen ausgezeichneten Diplomphysikers schlägt aber immer noch für die Forschung, vor allem für die Astronomie. Seit dem Sommer 2007 ist das 30-cm-Teleskop in seinem Garten sogar eine offizielle Sternwarte des Minor Planet Center, einer Unterabteilung der Internationalen Astronomischen Union. Seit 2003 ist er Kuratoriumsmitglied des MPIA. In diesem Gespräch erzählt er von seinem Werdegang und seinen Plänen.

Unternehmensberater, Politiker oder Journalist?

Frage: In Ihrer Diplomarbeit haben Sie sich mit astrophysikalischen Prozessen befasst, zum Beispiel mit der Frage, wie sich in Sternen neue Elemente bilden. Das ist ein spannendes Gebiet. Warum sind Sie trotzdem aus der Forschung ausgestiegen?

RY: Forschung hat mich immer fasziniert, doch der Alltag vieler Forscher ist häufig von Routine geprägt: Man beschäftigt sich sehr viel mit profanen Dingen, wie defekten Verstärkern, fehlerhaften Anzeigegegeräten, abstürzenden Computern und so weiter. Und man erlebt eine enorme Spezialisierung auf nur einem Gebiet.

Es war also eine aktive Entscheidung gegen eine Forscherkarriere, kein Abbruch wider Willen. Was führte Sie dann zum Journalismus?

RY: Journalismus war nicht der einzig denkbare Weg für mich. Vielmehr hatte ich zwei Forderungen an meine Arbeit: Erstens sollte meine Lernkurve immer nach oben gehen. Zweitens sollte meine Arbeit eine gesellschaftliche Relevanz besitzen, ich wollte – und will – etwas verändern.

Eine Art Sendungsbewusstsein?

RY: Ja, so kann man vielleicht sagen. Es gab für mich drei Möglichkeiten, diese Ziele zu erreichen. Eine zweite Möglichkeit neben dem Journalismus sah ich darin, in die Politik zu gehen. Ich war zwar nie parteilich organisiert, habe mich aber an der Uni sehr gegen die fortschreitende Militarisierung engagiert. In den achtziger Jahren standen ja Reagans Weltraumabwehrsystem SDI und der NATO-Doppelbeschluss an. Mittelstreckenraketen standen sich gefährlich nahe gegenüber. Es war an der Zeit endlich auszubrechen aus der »Logik« der gegenseitigen Zerstörung. Aus diesen Aktivitäten ist mein erstes Buch

als Herausgeber hervorgegangen: »Verantwortung für den Frieden.« Krieg darf in unserem Jahrhundert keine Option mehr sein!

Aber letztlich sind Sie doch nicht in die Politik eingestiegen.

RY: Nein, diese Option entfiel wieder, weil Politik vornehmlich danach trachtet, sich selbst zu erhalten. Parteien orientieren sich zu oft am Wähler, statt dem Wähler Orientierung zu bieten. Macht ist ein entscheidender Antrieb und Wählerstimmen zählen mehr als eine langfristige und reflektierte Sicht. Deshalb sind mir Physiker auch meist sympathisch: Die sind überwiegend nicht machtbesessen, sondern an einer sachorientierten Diskussion interessiert.

Und die dritte Option?

RY: Unternehmensberater.

Wirklich?

RY: Ja, Unternehmensberater erleben vielfältige Arbeitsgebiete, müssen sich in neue Unternehmen eindenken und können vieles verändern – eine positive Lernkurve. Mir wurde jedoch schnell bewusst, dass vor allem monetäre Kriterien im Vordergrund stehen. Das reine Gewinndenken reicht mir nicht aus, und oftmals werden zum Beispiel drastische Arbeitsplatzkürzungen über den Umweg von Beratern ausgesprochen. Letztlich erschien mir Journalismus als der weitaus attraktivste Weg.

In Ihrer Sendung »Quarks & Co« beschäftigen Sie sich mit allen Bereichen der Wissenschaft. Mittlerweile sind Sie für Ihre teils exzessiven Selbstversuche bekannt. Ihre Lernkurve steigt demnach wie gewünscht weiterhin an. Wie steht es aber mit dem Punkt Veränderungsmöglichkeiten?

RY: Medien prägen das Leben vieler Menschen. Im Schnitt sehen Bürger täglich zwei Stunden fern. Für mich sind Medien eine Chance, Menschen gut zu informieren und mündiger zu machen. Doch leider zeigt sich eine zunehmende Verflachung. Ich versuche, dem mit unterschiedlichen Sendeformaten aktiv entgegenzuwirken. Mit »Quarks & Co.« erreichen wir immerhin weit mehr als eine Million Zuschauer. Viele Sendungen werden im Unterricht genutzt. Selbst im Bereich der Unterhaltung erreiche ich mit der »Show der Naturwunder«, die ich an



Abb. V.6.1: Ranga Yogeshwar vor seinem Teleskop.

einigen Donnerstag Abenden zusammen mit Frank Elstner präsentiere, viele Menschen, die sonst niemals eine naturwissenschaftliche Sendung im Fernsehen einschalten würden. Bei sechs bis sieben Millionen Menschen kann man bestimmt auch einige mit Wissenschaft »infiltrieren«!

Stars @ School

Neben Ihren beruflichen Aktivitäten beim Fernsehen versuchen Sie auch mit anderen Mitteln die Wissenschaft unter Volk zu bringen.

RY: Ja, ich versuche immer wieder, meine Bekanntschaften mit einflussreichen Personen aus Kultur, Industrie und Politik für das Vermitteln von Wissen zu nutzen. Wir brauchen in unserem Land mehr aktive Fürsprecher für Bildung. Viele haben das inzwischen begriffen, doch wir müssen noch viel mehr leisten. Ein Versuch waren die Jahre der Wissenschaft. Es war eine Revolution, denn die Wissenschaft ist aktiv auf den Bürger zugegangen. Der Zuspruch war groß. So habe ich mich im Jahr 2000 für die Ausrufung des Jahres der Physik stark gemacht, und werde auch dafür eintreten, dass die Bundesregierung 2009 offiziell das Jahr der Astronomie verkündet. Aber es gibt bei

den Verantwortlichen Bestrebungen, das Jahr der Bundesrepublik auszurufen: Sie wird dann 60 Jahre alt und es wird Wahlkampf herrschen. Ein Jahr der Astronomie wäre mir jedenfalls lieber! Eine weitere Idee ist ein Projekt, das ich »Stars@School« nenne.

Wie soll das aussehen?

RY: Ich stelle mir vor, dass weltweit an den großen Observatorien kleinere Teleskope mit Schutzhütte aufgestellt werden, deren Wartung das Personal des Observatoriums übernimmt. Betrieben werden diese Geräte von Schulklassen per Internet.

Wie viele Standorte wären nötig, und wie groß sollten die Teleskope sein?

RY: Fünf oder sechs sollten es anfangs mindestens sein. Die Spiegel hätten vermutlich eine Öffnung von etwa 60 Zentimetern. Es gibt da ein Optimum unter den Gesichtspunkten der Kosten und der Wartung.

Wie sähe die Nutzung der Teleskope konkret aus?

RY: Eine Schulklasse könnte sich via Internet anmelden und ein bestimmtes Teleskop nutzen. Man könnte zum Beispiel eine Unterrichtseinheit ausarbeiten, sagen wir einmal zur Beobachtung Veränderlicher Sterne oder zur

Vermessung einer Mars-Schleife oder was auch immer. Die Auswertung dieser Daten oder Kurse zu bestimmten Themen könnten dann ins Internet gestellt werden, wo sie allen anderen zur Verfügung stehen. Engagierte Lehrer könnten so weit mehr Schüler mitreißen. Auf diese Weise könnten auch Schüler an nicht so gut ausgestatteten Schulen einen anspruchsvollen Physik- beziehungsweise Astronomieunterricht bekommen.

Sie halten Astronomieunterricht für wichtig?

RY: Astronomie eignet sich besonders gut für den naturwissenschaftlichen Schulunterricht: Denn von Mathematik über Physik bis hin zur Informatik oder den Geisteswissenschaften gibt es wunderbare Bezüge zur Astronomie. Daneben kann man je nach Alter der Schüler gute Module entwerfen: Junge Schüler bestimmen zum Beispiel die Rotationsgeschwindigkeit der Erde oder die Helligkeit der Sterne, ältere hingegen vermessen Kleinplaneten oder berechnen die Entfernung bestimmter Galaxien. Mit Astronomie lässt sich der naturwissenschaftliche Unterricht sehr anschaulich gestalten. Zudem gibt es die Internationalität: Der Himmel ist für uns alle gleich! Bei bestimmten Fragestellungen gibt es sogar internationalen Gedanken- und Erfahrungsaustausch – gerade für junge Menschen eine Chance, bereits in der Schule international zu arbeiten. Bei Stars@School hätte die weltweite Stationierung der Teleskope zudem den Vorteil, dass die Beobachtungen während der Schulzeit oder zumindest tagsüber stattfinden können. Deutsche Schulen würden dann eben ein Teleskop bei der Eso in Chile verwenden und chilenische Schüler umgekehrt eines auf dem Calar Alto in Südspanien oder auf Teneriffa.

Das hört sich verlockend an, aber woher soll das Geld kommen?

RY: Das sehe ich gar nicht einmal als großes Problem an. Im Vergleich zum Nutzungspotenzial ist die Investitionssumme vergleichsweise gering und käme vielen Schulen direkt zugute. Spenden von großen Unternehmen könnte man hierfür wohl erhalten: Ich kenne viele sehr engagierte Stiftungen und Unternehmen, die sich da bestimmt einbringen. Schwieriger ist die Frage der guten Organisation. Immerhin gibt es bereits hervorragende Initiativen. Diese gilt es einzubinden. Mir fehlt dafür leider im Moment die Zeit, doch ich bin zuversichtlich, dass sich hierfür auch eine langfristige Struktur aufbauen lässt. Außerdem müsste die Politik mitziehen, um das Projekt in die Unterrichtspläne der Schulen einzubauen. Die Chancen sind enorm und wären ein positiver Impuls für die Stärkung der Naturwissenschaften.

Eine faszinierende Idee, deren Umsetzung einen langen Atem erfordert. Vielleicht könnte man es – so es denn jemals laufen sollte – mit dem SuW-Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« verknüpfen.

RY: Das wäre natürlich wunderbar. Auf diese Weise könnte man auch immer mehr Physiklehrer für astronomische Themen im Unterricht gewinnen. Es gibt nämlich noch sehr viele Physiklehrer, die kaum Ahnung von Astronomie haben. Das finde ich sehr schade. Die Astronomie ist nicht nur eine faszinierende Wissenschaft, sie begeistert Jung und Alt und ist vielleicht auch gewissermaßen die Einstiegsdroge fürs Physik- oder Technikstudium.

Nun noch kurz zu Ihrer ganz persönlichen Droge Astronomie. Das Minor Planet Center hat Ihre Sternwarte offiziell anerkannt und ihr eine Nummer gegeben: B43. Was mussten Sie dafür tun?

RY: Den MPC-Stationscode erhält man, nachdem man die Bahnen einiger Kleinplaneten genauer vermessen hat. Das ist keine Kunst und für mich eher ein Ansporn gewesen. Astronomie erlaubt mir heute mit einem begrenzten Zeitbudget alle Facetten des wissenschaftlichen Arbeitens zu praktizieren: Messungen, Auswertung, Teile der Apparatur, Software und – am wichtigsten – die Freude am Himmel mit anderen teilen!

Grundlagenforschung braucht Fürsprecher in der Öffentlichkeit

Wie sind Sie Kurator des MPIA geworden?

RY: Ich war schon Kurator an den Max-Planck-Instituten für Gravitationsphysik in Golm und für Wissenschaftsgeschichte in Berlin. Dann hat mich der Präsident der MPG, Peter Gruss, gefragt, ob ich auch Kuratoriumsmitglied des Heidelberger MPIs werden möchte. Ich habe zugesagt, weil ich dieses Institut sehr schätze, aber weitere Ämter dieser Art werde ich erst einmal nicht übernehmen.

Wie sehen Sie Ihre Aufgabe im Kuratorium?

RY: Das Kuratorium soll ja die Verbindung zur Öffentlichkeit fördern und zum Beispiel mit den Direktoren die Entwicklung des Instituts und seine Wahrnehmung in der Öffentlichkeit diskutieren. Das tun wir Kuratoren natürlich bei den Sitzungen im Institut. Und selbstverständlich bin ich bereit, das Institut in speziellen Situationen zu unterstützen, so weit es in meinen Möglichkeiten liegt. Allerdings bedürfte es dazu – jedenfalls für mich – keiner regelmäßigen Sitzungen. Wenn es am Institut irgendwo klemmt, und ich vielleicht helfen kann, kann man mich immer anrufen. Ich selbst profitiere übrigens nicht von der Mitgliedschaft, denn ich habe ohnehin gute Kontakte zu allen möglichen Instituten.

Berücksichtigen Sie das MPIA in besonderer Weise, wenn Sie eine Sendung zum Thema Astronomie recherchieren?

RY: Eigentlich nicht. Ich denke immer zuerst an das Thema und erst in zweiter Linie an ein bestimmtes Institut. Aber grundsätzlich braucht jede Art von Grundlagenforschung ihre Fürsprecher in der Öffentlichkeit, in den Medien. Andernfalls wird sie von der Politik unglaublich schnell abgeschrieben. Und ich vertrete die Grundlagenforschung, denn ich weiß, woher ich komme und was mich fasziniert. So habe ich es zum Beispiel bei

meinem Kommentar in den Tagesthemen anlässlich von Peter Grünbergs Nobelpreis gehalten. Da habe ich ein ganz scharfes und klares Plädoyer für die Grundlagenforschung abgeliefert.

*Das Interview führten
Jakob Staude und Thomas Bührke (auch Photos)*

Ranga Yogeshwar wurde 1959 in Luxemburg geboren. Dort und in Indien, der Heimat seines Vaters, besuchte er die Grundschule. In Luxemburg machte er auch sein Abitur und erhielt Klavierunterricht am städtischen Konservatorium. Anschließend studierte er Physik an der Technischen Hochschule Aachen mit Abschluss als Diplomphysiker mit Fachrichtung »Experimentelle Elementarteilchenphysik und Astrophysik.« Es schlossen sich Forschungsarbeiten am Schweizerischen Institut für Nuklearforschung (SIN) Villigen, am CERN in Genf sowie am Forschungszentrum Jülich an.

1983 begann er mit ersten journalistischen Arbeiten bei Zeitungen und Zeitschriften sowie später bei Hörfunk und Fernsehen. Nach einem einjährigen Aufenthalt in Indien wurde er 1987 Wissenschaftsredakteur beim Westdeutschen Rundfunk in Köln. Seitdem moderierte er zahlreiche Sendungen, unter anderem Quarks & Co, W Wie Wissen, Die große Show der Naturwunder und seit März dieses Jahres Wissen vor 8.

Ranga Yogeshwar hat mehrere Bücher herausgegeben und geschrieben, darunter »Was ist AIDS?« und der »Der Kunststoffreport«. Er erhielt zahlreiche Auszeichnungen, darunter den Georg von Holtzbrinck Preis für Journalistik (1998), die Medaille für Naturwissenschaftliche Publizistik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (2002) und den Verdienstorden der Bundesrepublik Deutschland für sein Engagement im Bereich Bildung (2006).

Als einer der prominentesten Wissenschaftsvermittler ist er zudem ein gefragter Berater wissenschaftlicher und kultureller Einrichtungen und Organisationen. So ist er unter anderem Kurator der Max-Planck-Institute für Gravitationsphysik in Golm und für Astronomie in Heidelberg.

Mehr erfahren Sie unter
www.yogeshwar.de

Personal

Direktoren: Henning, Rix (Geschäftsführung)

Wissenschaftlicher Koordinator: Jäger

Öffentlichkeitsarbeit: Staude (Leitung)

Verwaltung: Voss (Leitung)

Wissenschaftliche Mitarbeiter: Afonso, Bailer-Jones, Bell, Birkmann (ab 14.2.), Beuther, Bouwman, Brandner, Dannerbauer, De Bonis, De Jong, Dullemond, Egner, Elias, Elting (ab 1.6.), Feldt, Fendt, Fried, Fujita (bis 14.2.), Gallazzi, Gässler, Gouliermis, Graser, Gredel, Häußler (12.2. bis 30.6.), Herbst, Hippelein, Hippler, Hofferbert, Huisken, C. Jäger, (1.3. bis 30.9.), K. Jäger, Jahnke, Jester, Klaas, Klahr, Köhler, Kornet (bis 31.7.), Krause, Kurk, Kürster, Launhardt, Lenzen, Marien, Matthews (1.11.), Meisenheimer, F. Müller, Mundt, Neumayer (8.2. bis 30.11.), Nielbock, Pavlov, Pitz, Quetz, Re Fiorentin (bis 31.8.), Röser, Sakelliou (bis 31.8.), Sandor (ab 1.11.), Scheithauer, Schinnerer, Schreiber, Semenov, Setiawan, Somerville, K. Smith, Staude, Tapken, Tiede, Tsalmantza (ab 1.11.), van den Bosch, Walter, S. Wolf

Doktoranden: Arold, Bicanski (ab 1.11.), Bigiel, Birkmann (bis 31.3.), Birnstiel (ab 1.9.), Boudreault, Brauer, Burtscher (ab 1.9.), Cacciato, Carmona (bis 31.7.), Chen, Downing, Crnojevic (15.10.), Da Rio (ab 1.10.), Debieu (bis 30.6.), Dettenrieder, Ernst, Esquivel, Federrath (ab 1.4.), Fallscheer, Foltin (ab 1.8.), Foyle (ab 1.9.), Franco Rico, Geisler (ab 1.4.), Geißler (ab 1.12.), Haan, Hanke (bis 31.7.), Häußler (bis 31.1.), Heinzler, Hennemann, Hormuth (ab 1.4.), Janson, Gianling (ab 1.10.), Johansen (bis 31.7.), Juhasz, Klement, Koposov, Kuiper, Mignone, More, Moster (ab 1.7.), Moyano (ab 15.9.), Natale (bis 15.5.), Neumayer, Nicol, Pedaletti, Peter, Rochau (ab 1.8.), Ruhland (ab 1.7.), Quanz (bis 31.7.), Riechers (bis 31.10.), Roccatagliata, Rodler, Rodriguez, Sauter (ab 12.3.), Schegerer, Schmalzl (ab 1.12.), T. Schmidt (ab 15.4.), Skelton, Smolic, Stegmaier, Stumpf, Tam, Tamburro, Tristram, Vasyunin, Vasyunina, Wang (ab 15.8.), Weise (ab 15.6.), Xue, Zatloukal, Zechmeister (ab 1.12.), Zsom (ab 1.9.), Zub

Diplomanden und studentische Hilfskräfte (UH): Aquino (ab 1.2.), Becker (ab 14.3.), Bestenlehner (ab 1.12.), Conrad (ab 1.10.), Daemgen (ab 1.12.), Datson (ab 16.1.), Fernandes (bis 30.11.), Flock (ab 18.9.), Hilscher (ab 1.8.), Hoffmann, Hormuth (bis 31.3.), Junginger (ab 1.2.), Kaplan (ab 1.9.), Koposov (bis 31.7.), Meyer, Moster (bis 31.7.), Müller A., Pitann (ab 1.6.), Rochau (bis 31.5.2006), Ruhland (ab 15.4.2006), Schmalzl (bis 30.9.), Schmidt, J. (bis 15.9.), Schmidt, T. (bis 14.4.), Schulze-Hartung (ab 1.9.), Wahed (1.2.), Weise (bis 28.2.), Fischer (ab 1.8.)

Diplomanden und Master-Studenten (FH): Priess (bis 28.2.), Meschke (bis 14.7.)

Stipendiaten: Berton (bis 12.3.), Bik (ab 15.10.), Blindert, van Boekel, Carson (ab 1.9.), Coleman, Dziourkevitch, Fontanot, Glaschke (bis 30.6.), Goldmann, Goto, Greve (ab 15.7.), Gustafsson, Joergens, Johansen (ab 1.8.), Kang, Khochfar (bis 30.9.), Knudsen (bis 30.9.), Labadie, Leroy, Linz, Maccio, Martin, Maulbetsch, Martinez Sansigre (ab 15.9.2006), Mosoni (ab 1.9.2006), Neumayer (ab 8.2.), Nilsson (ab 15.10.), Pasetto (ab 1.9.), Pasquali, Pavlyuchenkov, Roussel (bis 30.9.), Sicilia Aguilar, Skibba, Tubbs, Weldrake, Zheng (bis 26.2.), Zibetti (ab 1.9.)

Praktikanten: Arnold (1.3. bis 31.8.), Benesch (ab 1.9.), Krause (1.8. bis 31.12.), Ludwig (16.4. bis 31.12.), Maier (1.2. bis 31.7.), Meschke (ab 18.4.2006), Pfanschmidt (ab 1.9.), Prüfer (1.4. bis 30.9.), Salonen (1.9.2006 bis 28.2.), Schrödel (1.9.2006 bis 28.2.), Stricker (1.3. bis 31.8.2006), T. Zimmermann (1.3. bis 31.8.)

Technische Abteilungen: Kürster (Leitung)

Konstruktion: Rohloff (Leitung), Baumeister (Stellv.); Ebert, Münch; Auszubildende, Praktikanten, Wissenschaftliche Hilfskräfte: Schewtschenko

Feinwerktechnik: Böhm (Leitung), W. Sauer (Stellv.); Heitz, Hirt (ab 1.4.), Maurer, Meister, Meixner, Morr (bis 31.3.), Stadler; Auszubildende, Praktikanten, Wissenschaftliche Hilfskräfte: Euler, Finzer, Franke, Gärtner (bis 18.7.), Merx, Neidig (ab 1.12.), F. Sauer (ab 1.10.), K. Schmitt (1.9. bis 18.11.)

Elektronik: Grimm (Leitung bis 30.9.) Wagner (ab 1.10.); Stellvertreter: Wagner (bis 30.9.), Mohr (ab 1.10.); Adler (ab 1.4.), Alter, Ehret, Klein, Lehmitz, Mall, Mohr, Ramos, Ridinger, Westermann, Wrhel; Auszubildende, Praktikanten, Wissenschaftliche Hilfskräfte: Priess (bis 28.2.), Salonen (bis 28.2.), Schrödel (bis 28.2.), Maier (1.2. bis 31.7.), Benesch (ab 1.9.), Arnold (ab 1.3. bis 31.8.), Pfanschmidt (ab 1.9.), Zimmermann (1.3. bis 31.8.)

Instrumentierungssoftware/Projekt-EDV: Zimmermann (Leitung bis 31.1.), Briegel (ab 1.2.); Storz, Berwein, Borelli, Briegel, Kittmann (Gast Universität Köln), Neumann Leibold, Pavlov; Auszubildende, Praktikanten, Wissenschaftliche Hilfskräfte: Fischer (ab 1.8.)

Instrumentierung und Projektabwicklung: Marien (Leitung), Kürster (Stellv.); Bizenberger, Brix, De Bonis (Gast Universität Köln), Egner, Graser, Laun, Meschke (ab 15.7.)

Naranjo, J. Schmidt (ab 1.10.); Auszubildende, Praktikanten, Wissenschaftliche Hilfskräfte: Krause (1.8. bis 31.12.), Ludwig (16.4. bis 31.12.), Prüfer (1.4. bis 30.9.)

Administrativ-Technische Service-Abteilungen:

Verwaltung: Yoss (Leitung); Anders, Apfel, Baier, Beckmann, Bock (bis 31.3.), Gieser (bis 28.11.), Heißler, Hölscher, Schleich; S. Schmidt (ab 1.6.), Trenkler, Zähringer; Auszubildende: J. Zimmermann

EDV-Gruppe: Rauh (Leitung), Richter (Stellv.); Hiller, Piroth; Studentische Hilfskraft: Bestenlehner (ab 1.12.)

Graphikabteilung: Quetz; Meißner, Müllerthann

Bibliothek: Dueck

Fotolabor: Anders

Sekretariate: Bohm, Janssen-Bennynck, Koltés-Al-Zoubi, Seifert

Technischer Dienst und Kantine: Zergiebel (Leitung); F. Witzel (Stellv.); Behnke, Drescher (ab 1.2.), Herz (bis 31.1.), Jung, Lang, Nauss, B. Witzel, E. Zimmermann (ab 1.2.)

Freier Mitarbeiter: Thomas Bürhke

Wissenschaftliche Gäste: Stijn Wuyts, Holland, 9. – 12. Januar; Joseph Carson, JPL, 14. – 17. Januar; Michiel Min, Univ. Amsterdam, 22. Januar – 14. Februar; Alexander Richard, 24. – 26. Januar; Johannes Koppenhöffer, MPI f. Extraterr. Physik, 23. – 26. Januar; Pawel Pietrukowicz, Copernicus Astron. Center, 29. – 31. Januar; Robert Lupton, Princeton University, 28. Januar – 4. Februar; Pawel Pietrukowicz, Copernicus Astron. Center, 29. – 31. Januar; Nikoletta Sipos, Konkoly Observatory, 29. Januar – 17. Februar; Joao Alves, CAHA, 29. Januar – 2. Februar; Thorsten Naab, Univ. München, 30. – 31. Januar; Michaela Hirschmann, Univ. München, 30. – 31. Januar; Kim Nilsson, DCC Copenhagen, 30. Januar – 1. Februar; Federico Gasparo, INAF, 30. Januar – 3. Februar; Riccardo Smareglia, INAF, 30. Januar – 3. Februar; Matthias Heininger, MPIfR Bonn, 31. Januar – 1. Februar; Andreea Petric, Columbia Univ., 1. – 4. Februar; Emmanuel Di Folco, Obs. de Genève, 5. – 7. Februar; Thorsten Ratzka, AIP Potsdam, 7. – 9. Februar; Hsiang-Hsu Wang, ASIAA, Taiwan, 9. – 10. Februar; Andras Zsom, Konkoly Observatory, 9. Februar; Akemi Tamanai, FSU Jena, 5. Februar – 5. März; Hsiang-Hsu Wang, Chiba Univ., 9. – 10. Februar; Joanna Arka, Univ. Athens, 11. – 13. Februar; Jennifer Connelly, Wesleyan Univ., 11. – 15. Februar; Denija Crnojevic, Univ. Trieste, 11. – 15. Februar; Warrick Lawson, Univ. New South-Wales, 12. – 15. Februar; Owen Matthews, Paul Scherrer Inst. Zürich, 12. – 13. Februar; Stefano Zibetti, MPE, 12. Februar; Ulfert Wiesendahl, Univ. Hamburg, 14. Februar; Olga

Zacharopoulou, Univ. Athens, 13. – 15. Februar; Triaud Amaury, Univ. St. Andrews, 14. – 16. Februar; Nicola Da Rio, Univ. Trieste, 13. – 16. Februar; Silvia Leurini, ESO, 13. – 16. Februar; Hauke Engel, Oxford University 15. – 16. Februar; Peter Abraham, Konkoly Observatory 18. – 20. Februar; Andrea Isella, INAF, 19. – 23. Februar; Marco Miranda, Univ. Zürich, 20. – 23. Februar; Olof van den Berg, Univ. Utrecht, 21. – 22. Februar; Martin Henze, 25. – 27. Februar; Edward Taylor, Leiden Univ., 26. Februar – 9. März; Wu Szu-Ying, Inst. Astron., Taiwan, 28. Februar – 6. März; Daniel Sevilla Sanchez, Univ. Mainz, 6. März; Giovanni Natale, Univ. Napoli 6. – 10. März; Michihiro Takami, SUBARU Telescope, 8. – 13. März; Yutaka Hayano, SUBARU Telescope, 8. – 13. März; Masa Hayashi, SUBARU Telescope, 8. – 13. März; Shoken Miyama, SUBARU Telescope, 8. – 10. März; Andras Zsom, Konkoly Observatory, 9. März; Daniel Angerhausen, Cologne Univ., 9. März; Andre Lipand, Univ. Tartu, 5. – 18. März; Elmar Körding, Univ. Southampton, 12. – 16. März; Jose Rodriguez, IAC, 12. März; Valery Dikarev, MPS, 14. – 15. März; Jürgen Fliri, LMU München, 15. März; Thorsten Ratzka, AIP, 15. – 16. März; Michael Weiler, TU München, 16. März; Klaus Pontoppidan, Caltech, 11. – 25. März; Erica Ellingson, Subaru Telescope, 13. – 23. März; S. Josephine Chang, UK, 22. – 23. März; René Geißler, Univ. HD, 19. März – 13. April; Martin Altmann, Univ. Chile, 3. April; Tyler Bourke, Harvard CfA, 9. – 12. April; Mark Sargent, ETH Zürich, 12. April; Maximiliano Moyano, 12. – 18. April; Jorge Pinedas, AlfA, Bonn, 13. April; Nikolai Voshchinnikov, St. Petersburg Univ., 22. April – 20. Mai; Andras Zsom, Konkoly Observatory, 16. April – 21. Mai; John Peacock, Inst. f. Astr., Edinburgh, 23. – 25. April; Mordecai-Mark Mac Low, Am. Museum Nat. Hist., 12. April – 15. September; Davide Elia, Univ. Lecce, Italy, 24. – 26. April; Tsevi Maze, Wise Observatory; 25. – 29. April; Scott Trager, Univ. Groningen, 30. April – 2. Mai; Mark Swain, JPL, April 30. April – 10. Mai; Eric Hoveland, JPL, 30. April – 4. Mai; Christian Wolf, Oxford University, 2. – 4. Mai; Eric Thiebaut, Obs. de Lyon, 1. – 5. Mai; Pawel Zielinski, CA Torun, 2. – 5. Mai; Tomek Laczkowski, CA Torun, 2. – 5. Mai; Stefan Kraus, MPI Radioastronomie, 2. – 5. Mai; Siegfried Falter, Dublin City Univ., 2. – 3. Mai; Vanessa Menke, Indian Inst. Techn., 4. Mai – 30. August; Vamsi P. Pingali, 4. Mai – 25. Juli; David Golimowski, Johns Hopkins Univ., 6. – 8. Mai; Holland Ford, Johns Hopkins Univ., 6. – 8. Mai; Marcos Ubierna Gorricho, IAA, 3. – 15. Mai; Erica Ellingson, Univ. Colorado, 9. – 13. Mai; Til Birnstiel, Univ. Würzburg, 14. – 15. Mai; Lengger, MPG Revision, 7. – 11. Mai; Scott Michael, Indiana University, 1. – 25. Mai; Richard Durisen, Indiana Univ., 16. Mai – 3. Juli; Götz, MPG/Revision, 14. – 25. Mai; David Hernandez, Univ. Arizona, Tucson, 16. Mai – 15. August; Chien Peng, STScI, 16. Mai – 17. Juni; Jeffrey S. Oishi, Am. Mus. Nat. Hist., 18. – 23. Mai; Alan McConnachie, Univ. Victoria 21. – 29. Mai; Christy Tremonti, Univ. Arizona, 27. – 30. Mai; Zaunseder, MPG/Revision, 21. Mai – 1. Juni; Ari Maller, City Univ. NY, 2. – 7. Juni; Matt Covington, Univ. California 3. – 6. Juni; Romeel Dave,

Steward Obs. 10. Juni – 21. Juli; Götz, MPG Revision, 11. – 15. Juni; Giovanni Pinzon, Univ. Bogotá, 12. – 15. Juni; Harinder Singh, Univ. Delhi, 15. – 22. Juni; Jason Rowe, Univ. Brit. Columbia, 25. – 29. Juni; Kerstin Meyer-Ross, MPI f. Comp. Science 21. – 24. Juni; Min Fang, Purple Mount. Obs. 1. Juni – 31. August; Taysun Kimm, Yonsei Univ. 2. Juni – 31. August; David Hogg, NY Univ., 11. Juni – 5. August; Veronica Castellanos, Univ. Mexico, 11. Juni – 14. September; Giovanni Pizon, Univ. Bogotá, 12. – 14. Juni; Veronica Castellanos, Univ. Mexico, 11. Juni – 14. September; Manuel Guedel, ETH Zürich, 11. Juni – 31. August; Benjamin Saliwanchik, Univ. Chicago, 20. Juni – 20. August; Akemi Tamanai, FSU Jena, 6. – 27. Juni; Jason Rowe, Univ. Brit. Columbia, 25. – 29. Juni; Kathryn Johnston, Columbia Univ., 25. – 30. Juni; Lukasz Wyrzykowski, Cambridge Univ., 25. – 26. Juni; Michael Smith, 25. – 29. Juni; Markus Hartung, ESO Santiago, 25. Juni – 12. Juli; Feng Xu, China, 27. – 29. Juni; Tom Megenth, Ritter Obs., 27. – 29. Juni; Steve Beckwith, STScI, 2. – 9. Juli; Nikoletta Sipos, Konkoly Univ., 2. – 9. Juli; Peter Abraham, Konkoly Observatory., 2. – 9. Juli; Agnes Kospal, Konkoly Obs., 2. – 9. Juli; Jakob Walcher, 2. – 8. Juli; Joe Shields, Ohio Univ., 1. – 14. Juli, Christian Wolf, Univ. Oxford, 2. – 14. Juli; Peter Schuller, Univ. Paris, 4. – 11. Juli; Chao-Chin Yang, Am. Museum Nat. Hist., 7. Juli – 15. September; Torsten Boeker, ESA/ESTEC, 9. – 13. Juli; Ronin Wu, NY Univ., 9. – 13. Juli; Adi Zolotov, NY Univ., 9. – 13. Juli; Owen Matthews, Paul Scherrer Inst. Zürich, 10. – 11. Juli; Barry Rothberg, STScI, 11. – 13. Juli; Ben Oppenheimer, Steward Obs., 6. – 21. Juli; Kristian Finlator, Steward Obs. 8. – 21. Juli; Ignacio Ferreras, Kings College, London, 8. – 28. Juli; Warrick Lawson, Univ. New South Wales, 17. – 21. Juli; Gwendolyn Meeus, AIP, 17. – 21. Juli; Vincent Coudé du Foresto, Obs. Paris, 19. – 20. Juli; Ronin Wu, NY Univ., 22. – 26. Juli; Zsolt Sandor, Eotvos Univ., 23. – 24. Juli; Martin Ilgner, Jena Optik, 13. Juli; Lukasz Wyrzykowski, Cambridge Univ., 15. – 16. Juli; Carlos Eiroa, Univ. Madrid, 26. Juni – 10. August; Csaba Kiss, Konkoly Observatory, 18. Juli; Houjun Mo, Univ. of Mass., 15. Juli – 24. August; Julianne Dalcanton, Univ. Washington, 24. Juli – 24. August; David Martinez Delgado, IAC, 1. – 31. August; Jim Pizagno, State Univ. NY, 10. August – 5. September; Elena Puga, Katholike Univ. Leuven, 14. August – 28. September; Jochen Eislöffel, LSW Tautenburg, 20. – 21. August; Daniel Harbeck, Univ. Wisconsin, 23. August; Alma Ruiz Velasco, Dark Cosmology Center, Kopenhagen, 8. – 10. August; Stefano Zibetti, MPE, 27. – 28. August; Robert Williams, STScI Baltimore, 2. – 6. September; Felicitas Mokler, TU Braunschweig, 10. – 12. September; Johannes Koppenhöfer, MPE, 3. – 14. September; Andrey Sobolev, Ural State Univ., 7. September – 27. Oktober; Annie Robin, Observatoire de Besançon, 9. – 11. September; Céline Reylyé, Observatoire de Besançon, 9. – 11. September; Henry Lee, Gemini South, Chile, 6. – 9. September; Brad Warren, McMaster Univ. Canada, 29. September – 3. Oktober; Peter Barthel, Kapteyn Inst., Groningen, 30. September – 2. Oktober; Mislav Balokovic, Univ. Zagreb, 15. September – 14. Oktober; Tesse van der

Laan, Kapteyn Inst. Groningen, 30. September – 6. Oktober; Davide Elia, Univ. Lecce, 1. – 26. Oktober; Gaspar Bakos, CfA, Harvard Univ. 10. – 12. Oktober; Brian Yanny, Fermi Nat. Acc. Lab, 15. – 21. Oktober; Stephane Courteau, Queens Univ., 14. – 27. Oktober; Hans-Rainer Klöckner, Oxford Univ., 22. – 26. Oktober; Andrew Youdin, Univ. Toronto, 22. Oktober – 3. November; Boris Häussler, Univ. Nottingham, 1. – 2. November; Daniel McIntosh, Univ. Massachusetts, 8. – 9. November; Ruud Visser, Sterrewacht Leiden, 9. – 17. November; Rob Wittenmyer, Univ. Texas, 11. – 14. November; Nikoletta Sipos, Konkoly Observatory, 12. November – 20. Dezember; Dimitri Vibe, Russ. Acad. Sci., Moscow, AIP, 19. November – 19. Dezember; Gwendolyn Meeus, 19. – 23. November; Christian Thalmann, ETH Zürich, 22. – 23. November; Katherine Inskip, Univ. Sheffield, 19. – 20. November; Wladimir Lyra, Uppsala Astron. Obs., 18. November – 1. Dezember; Henry Lee, Gemini South, Chile, 23. November – 8. Dezember; Doug Lin, UC Santa Cruz, 25. – 28. November; Warrick Lawson, Univ. New South Wales, 27. – 2. Dezember; Warrick Lawson, 6. – 8. Dezember; Henrik Nissen, Univ. Aarhus, 3. – 5. Dezember; Santabrata Das, Sejong Univ., 9. – 15. Dezember; Matthew Hayes, Univ. Geneva, 13. – 15. Dezember; Paola Re Fiorentin, Univ. Lubjulina, 7. – 21. Dezember; Boris Häussler, Univ. Nottingham, 14. – 21. Dezember; Marijn Franx, Leiden Observatory, 18. – 20. Dezember; R. Wolf, 18. – 20. Dezember; Thorsten Ratzka, AIP Potsdam, 19. – 20. Dezember.

Observatorium Calar Alto / Almeria, Spanien

Seit Juni 2005 ist das Observatorium ein Konsortium, betrieben vom Consejo Superior de Investigaciones Cientificas und der Max-Planck-Gesellschaft.

Astronomie Koordination: Thiele

Teleskoptechnik und EDV: Henschke (bis 31. 1.), Müller, W.

Technischer Dienst / Hausdienst: Klee

Arbeitsgruppen

Abteilung Stern- und Planetenentstehung

Direktor: Thomas Henning

Infrarot-Weltraum-Astronomie: Oliver Krause (Leitung), Stephan Birkmann, Thomas Blümchen, Jeroen Bouwman, Helmut Dannerbauer, Ulrich Grözinger, Martin Hennemann, Ralph Hofferbert, Armin Huber, Ulrich Klaas, Ernest Krmpotic, Friedrich Müller, Markus Nielbock, Silvia Scheithauer, Jürgen Schreiber, Christian Schwab, Jutta Stegmaier

Sternentstehung: Thomas Henning (Leitung), Aurora Aguilar Sicilia, Andrés Carmona, Joseph Carson, Xuepeng Chen, Min Fang, Markus Feldt, Miwa Goto, Attila Juhasz, Ralf Launhardt, Rainer Lenzen, Hendrik Linz, Laszlo Mosoni, Yaroslav Pavlyuchenkov, Diethard Peter, Sascha Quanz, Veronica Roccatagliata, Markus Schmalzl, Dmitri Semenov, Robert Tubbs, Roy van Boekel, Antonin Vasyunin, Tatiana Vasyunina

Braune Zwerge/Exoplaneten: Reinhard Mundt, (Leitung), Cristina Afonso, Alessandro Berton, Wolfgang Brandner, Matilde Fernandez, Kerstin Geißler, Bertrand Goldmann, Felix Hormuth, Markus Janson, Viki Joergens, Boyke Rochau, Florian Rodler, Victoria Rodriguez Ledesma, Johny Setiawan, Patrick Weise, David Weldrake, Matthias Zechmeister

Theorie (SP): Hubertus Klahr (Leitung), Andrej Bicanski, Frithjof Brauer, Frank Dettenrieder, Natalia Dziourkevitch, Artur Gawryszczak, Patrick Glaschke, Anders Johansen, Rolf Kuiper

Laborastrophysik: Friedrich Huisken (Leitung), Marco Arold, Olivier Debieu, Cornelia Jäger, Torsten Schmidt, Angela Staicu

Interferometriezentrum FRINGE: Uwe Graser (Leitung), Ralf Launhardt, Thorsten Ratzka, Jürgen Steinacker

Adaptive Optik: Wolfgang Brandner (Leitung), Alessandro Berton, Nicola Da Rio, Fulvio De Bonis, Markus Feldt, Dimitrios Gouliermis, Stefan Hippler, Felix Hormuth, Micaela Stumpf

Emmy-Noether-Gruppe I (»Entwicklung zirkumstellarer Staubscheiben zu Planetensystemen«): Sebastian Wolf (Leitung), Kacper Kornet, Jürgen Sauter, Alexander Schegerer

Emmy-Noether-Gruppe II (»Entstehung und Eigenschaften substellarer Objekte«): Coryn Bailer-Jones (Leitung), Steve Boudreault, Paola Re Fiorentin

Emmy-Noether-Gruppe III (»Entstehung massereicher Sterne«): Hendrik Beuther (Leitung), Cassandra Fallscheer, Javier Rodon

MPG – Nachwuchsgruppe: Cornelis Dullemond (Leitung), Tilmann Birnstiel, Riccardo Coratella, Zsolt Sandor, Andras Zsom

MPG – Minerva-Gruppe: Cristina Afonso (Leitung), Maximiliano Moyano, Nikolai Nikolov

Abteilung Galaxien und Kosmologie

Direktor: Hans-Walter Rix

Strukturen und Dynamik von Galaxien: Hans-Walter Rix (Leitung); Josef Fried, Matthew Coleman, Jelte De Jong, Nadine Neumayer, Anna Pasquali, Nicolas Martin, Stefano Zibetti, Kelly Foyle, Rainer Klement, Domenico Tamburro, Sergey Koposov, Xiangxiang Xue; Coryn Bailer-Jones (Leitung GAIA Projekt-Gruppe); Christian Elting, Kester Smith, Carola Tiede

Sternpopulation und Sternentstehung: Fabian Walter (Leitung); Sebastian Jester, Ioannis Bagetakos, Frank Bigiel, Kirsten Kraiberg Knudsen, Adam Leroy, Dominik Riechers, Hélène Roussel; Coryn Bailer-Jones (Leitung Emmy-Noether-Gruppe); Paola Re Fiorentin, Paraskevi Tsalmantza, Steve Boudreault; Thomas Herbst (Leitung); Wolfgang Gäßler, Maiken Gustafsson, Lucas Labadie, Fulvio de Bonis, Frank Kittmann, Stefan Hanke

Galaxienentwicklung und Kosmologie: Eric Bell (Leitung Emmy-Noether-Gruppe); Anna Gallazzi, Boris Häußler, Xianzhong Zheng, Isabel Franco, Aday Robaina, Christine Ruhland, Rosalind Skelton; Klaus Meisenheimer (Leitung); Hermann-Josef Röser, Hans Hippelein, Kim Nilsson, Irini Sakelliou, Kris Blindert, Leonard Burtscher, Isabel Franco, Hélène Nicol, Konrad Tristram, Michael Zatloukal

Aktive Galaxiekern: Klaus Meisenheimer (Leitung); Christian Fendt, Sebastian Jester, Marc Schartmann, Konrad Tristram; Eva Schinnerer (Leitung Sonderprogramm zur Förderung hervorragender Wissenschaftlerinnen); Knud Jahnke, Alejo Martinez Sansigre, Sebastian Haan, Vernesa Smolcic; Knud Jahnke (Leitung Emmy-Noether-Gruppe, im Aufbau)

Theorie der Galaxienentstehung und großräumiger Struktur: Rachel Somerville (Leitung), Fabio Fontanot, Akimi Fujita, Andrea Maccio, Christian Maulbetsch, Ben Moster, Hsiang-Hsu Wang; Frank van den Bosch (Leitung Selbstständige Nachwuchsgruppe), Marcello Cacciato, Xi Kang, Surhud More, Ramin Skibba, Jianling Gan

Instrumentierung: Thomas Herbst (Leitung), Hermann-Josef Röser, Josef Fried, Wolfgang Gäßler, Sebastian Egner, Stefan Hanke, Lucas Labadie, Eva Meyer

Lehrveranstaltungen

Wintersemester 2006 / 2007

- H. Beuther, Ch. Fendt: Outflows and Jets: theory and observations (Vorlesung, IMPRS)
 Ch. Fendt, K. Meisenheimer, H.-W. Rix: Current research topics in Astrophysics (IMPRS-Seminar, Oberseminar mit J. Wambsganss, ZAH)
 J. Fried: Galaxien (Vorlesung und Übungen, mit B. Fuchs, ZAH)

Sommersemester 2007

- C. Bailer-Jones: Machine learning, pattern recognition and statistical data mining (Vorlesung)
 H. Beuther, Sebastian Wolf: Stern- und Planetenentstehung (Vorlesung)
 C. Fendt, S. Wolf: Current research Topics in Astrophysics (IMPRS-Forschungsseminar, mit A. Just und R. Spurzem, ZAH)
 C. Dullemond: Numerical hydrodynamics (Vorlesung)
 C. Dullemond: Die Urmaterie, aus der Sterne und Planeten entstehen (Forschungsseminar, mit H. Krüger und E. Grün, MPIK, sowie M. Tieloff, Min. Institut)

Wintersemester 2007 / 2008

- E. Bell: Observing the Big Bang (Vorlesung)
 Ch. Fendt: Current research Topics in Astrophysics (IMPRS Forschungsseminar, mit J. Wambsganß, ZAH)
 Ch. Fendt, Klaus Meisenheimer: Current research Topics in Astrophysics (IMPRS-Forschungsseminar, mit B. Fuchs und J. Wambsganß, ZAH)
 Th. Henning: Physik der Sternentstehung (Oberseminar)

- Th. Henning: Substellare Objekte – Extrasolare Planeten und Braune Zwerge (Vorlesung, mit B. Goldmann, ZAH)
 Th. Henning: Physik der Sternentstehung (Oberseminar)
 K. Meisenheimer: Sources of High Energy Radiation (Oberseminar, mit M. Camenzind und S. Wagner, ZAH, sowie J. G. Kirk, MPIK)
 H.-J. Röser: Einführung in die Astronomie und Astrophysik, III (Seminar, mit J. Heidt, LSW und J. Wambsganß, ZAH)

- Th. Henning: Physik der Sternentstehung (Oberseminar)
 K. Meisenheimer: Aktive Galactic Nuclei – Theory and Observations (Vorlesung)
 R. Mundt, H.-J. Röser: Einführung in die Astronomie und Astrophysik III (Seminar, mit J. Wambsganß, ZAH)
 Blockvorlesung: »The Hydrodynamics of Young Circumstellar Disks«, MPIA, 11. – 12. Juni (Richard H. Durisen, Indiana University)

- K. Meisenheimer: Quellen hochenergetischer Strahlung (Oberseminar, mit S. Wagner, ZAH und J. G. Kirk, MPIK)
 H.-J. Röser: Einführung in die Astronomie und Astrophysik III (Seminar, mit E. Grebel, ZAH und J. Heidt, LSW)
 Sebastian Wolf: Einführung in die Astronomie und Astrophysik I (Vorlesung und Übungen, mit Max Camenzind, ZAH)

Mitarbeit in Gremien

- C. Bailer-Jones: Mitglied im GAIA Science Team; Mitglied im GAIA Data Processing and Analysis Consortium Executive; Manager des Subconsortiums »Astrophysical Parameters« im GAIA Data Processing and Analysis Consortium; Mitglied im Scientific Organizing Committee of Commission 45 (Stellar Classification) of the International Astronomical Union; Mitglied im Observing Programme Committee (OPC) der ESO
 E. Bell: Mitglied im SDSS Collaboration Council und im Pan-STARRS1 Science Council
 Ch. Fendt: Mitglied im IMPRS board und im Ad-hoc Ausschuss Promotionsstudium der Universität Heidelberg
 R. Gredel: Mitglied im ESO OPC, Vorsitzender des OPC panel C3; Vorsitzender des PS1 Visiting Committee und des

- ARENA NA2; Mitglied im ESO ELT-ESE und im STAC des MPIA; Vorsitzender des Komitees CAHA 2013+
 M. Hennemann: Studentensprecher
 Th. Henning: Vizepräsident des ESO Council; Mitglied im SOFIA Science Council; Vorsitzender des German Interferometry Centre FRINGE; Präsident des Science Council der European Interferometry Initiative; Mitglied im Pan-STARRS1 Board; Mitglied der wissenschaftlichen Beiräte des Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik, Freiburg und der Thüringer Landessternwarte, Tautenburg; Co-Investigator der IR-Instrumente FIFI-LS (SOFIA), PACS (HERSCHEL), MIRI (JWST), SPHERE (VLT), PRIMA-DDL (VLT), MATISSE (VLT); Mitglied der AG (Astronomische Gesellschaft) und der DPG (Deutsche Physi-

- kalische Gesellschaft); Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina (Obmann für Astrophysik); Mitglied der Berufungskommission »Professur für Astrophysik«, ETH Zürich
- T. Herbst: Mitglied des MPIA PhD Thesis Advisory Committee
- F. Huisken: Mitglied im International Advisory Committee of the »International Symposia on Rarefied Gas Dynamics« (RGD); Mitglied im International Advisory Board der rumänischen Konferenzserie »ROMOPTO«
- K. Jäger: LBT-Beteiligungsgesellschaft; ARENA: Ansprechpartner PR
- H. Klahr: Mitglied des MPIA PhD Thesis Advisory Committee
- U. Klaas: Mitglied im HERSCHEL Calibration Steering Group, Vorsitzender des Bibliothekskomitees
- K. K. Knudsen: Mitglied im Scientific Committee of the Instrument Center for Danish Astrophysics
- M. Kürster: Mitglied im Organizing Committee for the Creation of IAU Commission 53, »Extrasolar Planets«
- R. Launhardt: Mitglied im Beirat der Ernst-Patzer-Stiftung
- Ch. Leinert: Mitglied des VLTI subpanel im ESO Science and Technical Committee
- R. Lenzen: Mitglied im Komitee zur Vergabe der MPG-Beobachtungszeit am 2.2-m-Teleskop der ESO/MPG
- A. Pasquali: Mitglied der ESO panels
- H.-W. Rix: Vorsitzender des wissenschaftlichen Beirats des Astronomischen Instituts Potsdam (AIP); Mitglied im Board der Large Binocular Telescope Corporation (LBTC) und im Board der Large Binocular Telescope Beteiligungsgesellschaft (LBTB); Mitglied im JWST/NIRSPEC Science Team; Mitglied im BMBF-Gutachterausschuss »Astrophysik und Astroteilchenphysik«; Mitglied der DFG Fachkollegien; Mitglied »at large« der ASTRONET Infrastructure Roadmap Working Group
- H.-J. Röser: Mitglied im Komitee zur Vergabe der MPG-Beobachtungszeit am 2.2-m-Teleskop der ESO/MPG und im MPIA PhD Thesis Advisory Committee
- E. Schinnerer: Proposal Referee für das SPITZER Space Telescope (Zyklus 4); Mitglied im Erich-Patzer-Preiskomitee
- F. Van den Bosch: Mitglied im Science Policy Oversight Committee for Pan-STARRS 1
- S. Wolf: Mitglied im Selection Committee at the Centro di Astrofisica de la Universidade de Porto (CAUP) for advanced Postdocs and high-level Researchers; Mitglied im Strategic Time Allocation Committee (STAC) des MPIA
- F. Walter: IRAM Program Committee (Vorsitz); NRAO User's Committee (Mitglied); MPIA Strategic Time Allocation Committee (Mitglied)

Weitere Aktivitäten am Institut

Im Physikalischen Fortgeschrittenenpraktikum an der Universität Heidelberg betreute Stefan Hippler den Versuch »Wellenfrontanalyse mit einem Shack-Hartmann-Sensor« und Josef Fried den Versuch »CCD-Photometrie«

Den Girls' Day am 26. April organisierten Stephan Birkmann, Eva Meyer, Eva Schinnerer und Jutta Stegmaier

Das BOGY-Praktikum (22. – 26. Oktober) organisierte Klaus Meisenheimer, unterstützt von Klaus Jäger, Nadine Neumayer, Jutta Stegmaier, Konrad Tristram und anderen.

Die Reihe Öffentlicher Vorträge »Astronomie am Sonntag Vormittag« im MPIA (10. Juni – 29. Juli) wurde organisiert von Klaus Jäger, Jakob Staude und Jutta Stegmaier sowie der Hilfe vieler anderer.

Unsere Veranstaltung zur Nacht der Wissenschaft am 10. November wurde organisiert von Klaus Jäger, unterstützt von Coryn Bailer-Jones, Stephan Birkmann, Jeroun Bouwman, Helmut Dannerbauer, Ulrich Grözinger, Martin Hennemann, Tobias Junginger, Oliver Krause, Markus Nielbock, Silvia Scheithauer, Jutta Stegmaier u.v.a., sowie B. Feuerstein (MPIK) und Holger Mandel (LSW)

Im Berichtsjahr wurden 650 Besucher in 26 Gruppen durch das Institut geführt (Axel M. Quetz, Stephan Birkmann, Cassandra Fallscheer, Patrick Weise und andere); Klaus Jäger organisierte auch eine Reihe von

Sonderführungen, darunter z.B. »Baden-Württemberg International, Gesellschaft für internationale wirtschaftliche und wissenschaftliche Zusammenarbeit« am 29. Januar; Stift Neuburg, 13. Februar; Gäste vom SUBARU-Teleskop, 9. März; International Max Planck Research School, 30. August; Förderkreis Planetarium Göttingen (FPG), 28. Oktober; Fachbeirat und MPG-Präsidium, 9. Oktober (mit Kürster, Herbst, Krause, Lenzen, u.a.); Bürgermeister Gerner mit Gästen des Rotary Club Schweiz, 17. November.

Es wurden zehn Pressemitteilungen herausgegeben, zahlreiche Rundfunk- und Fernseh-Interviews gegeben, darunter RadioEins/MDR, ZDF-Heute Journal, Deutsche Welle-TV und eine neue Broschüre für das große Publikum gestaltet (Klaus Jäger, Axel M. Quetz, Jakob Staude)

Roland Gredel war im Juli Gastprofessor an der Université Louis Pasteur in Straßburg

Klaus Jäger beteiligte sich an der Organisation der Vortragsreihe »Astronomie in Heidelberg« am Planetarium Mannheim.

Martin Kürster war Gutachter für die Zeitschrift *Astronomy & Astrophysics*.

Rainer Lenzen war Sicherheitsbeauftragter und Vertreter der Schwerbehinderten.

Markus Nielbock: Participation war im »Initiativkreis für Horizontastronomie im Ruhrgebiet« zur Foerderung von öffentlicher Bildung im Gebiet der Astronomie tätig (25. – 29. Juni) und betreute ein astronomisches Schulpraktikum der Pädagogischen Hochschule Zentralschweiz Luzern am Observatorium Hoher List.

Jakob Staude, unterstützt von Axel M. Quetz, gestaltete den 46. Jahrgang der Zeitschrift Sterne und Weltraum. Sebastian Wolf organisierte das Programm »Miniforschung« für Studenten am MPIA

Preise

Eric Bell erhielt den Heinz-Maier-Leibnitz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft.
Henrik Beuther erhielt den Biermann-Preis der Astronomischen Gesellschaft.
Fabio Fontanot erhielt für seine Dissertation den Tacchini-Preis der Italienischen Astronomischen Gesellschaft.
Anders Johansen, Boris Häußler und Konrad Tristram erhielten den Ernst-Patzer-Preis zur Förderung von Nachwuchswissenschaftlern.
Nicolas Martin erhielt den Preis der »Société des amis des Universités de l'Académie de Strasbourg« für eine der

besten an der Universität Straßburg im Jahr 2006 verteidigten Dissertationen (der Preis wurde im Jahr 2007 vergeben).

Benjamin Moster erhielt den Otto Haxel Prize der Universität Heidelberg

Dominik A. Riechers wurde summa cum laude promoviert und erhielt für sein Forschungsprojekt »From the Epoch of Reionization to the Peak of Galaxy Formation: Properties of Intensely Star-Forming Galaxies in the Early Universe« ein HUBBLE Postdoctoral Fellowship in Caltech (2007 – 2010).

Vereinbarkeit von Wissenschaft, Beruf und Familie

Am Institut wurden im Laufe des Jahres weitere Maßnahmen zur besseren Vereinbarkeit von Beruf und Familie durchgeführt. Neben dem bereits bestehenden Baby-Büros für junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, der Schaffung von Möglichkeiten familienbedingter Tele- und Heimarbeit sowie der Verbesserung des Informationsaustausches zum Thema Vereinbarkeit von Beruf und Familie, wurde ein institutseigener Kinderbetreuungsraum eingerichtet. Außerdem hat das Institut gemeinsam mit den anderen Heidelberger Max-Planck-Instituten Belegungsrechte für insgesamt 15 Krippen- und Kindergartenplätze erworben. Das MPIA bietet zudem einen Kinder-Betreuungsservice

für Kongresse und andere größere wissenschaftliche Veranstaltungen an. Das Institut ist neben zahlreichen anderen wichtigen wissenschaftlichen Einrichtungen und Wirtschaftsunternehmen aus der Region Mitglied beim Heidelberger Aktionsbündnis für Familie. Ziel dieser vernetzten Wissenschaftseinrichtungen und Wirtschaftsunternehmen ist es, durch eine familienfreundliche Unternehmenspolitik, Heidelberg als Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort attraktiver zu gestalten. Die Maßnahmen zur besseren Vereinbarkeit von Beruf und Familie am Institut werden laufend fortentwickelt, um somit die Rahmenbedingungen für die Forschungsarbeit weiter zu verbessern.

Zusammenarbeit mit Firmen

4D electronic GmbH, Bretten
AB multimedia GmbH, Oberding
ABB (ehem. Hartmann+Braun), Alzenau
ADR, Paris
Advanced Office, Bochum

Abacus Deltron GmbH, Unterhaching
Agilent Technologie, Böblingen
Allice Messtechnik GmbH, Frankfurt
allSMT GmbH&Co.KG, Roetgen
Almet-AMB, Mannheim
Alternate, Linden

America II Europe GmbH, Mönchenglöblich
Amphenol AIR LB GmbH, Saarlouis
AmpPower GmbH, Bad Homburg v.d.H
Angst+Pfister, Mörfelden
APE Elektronik, Kuppenheim

- Arlt Computer, Magstadt
 Arrow Central Europe GmbH,
 Dreieich
 Arthur Henninger, Karlsruhe
 ASKnet, Karlsruhe
 ASYS Prozess- und Reinraumtechnik,
 Dornstadt
 Auer Paul GmbH, Mannheim
 Axsys technologies, Rochester Hills
 bacuplast GmbH
 Baier Digitaldruck, Heidelberg
 Barth, Leimen
 Bechtle, Neckarsulm
 Bectronic GmbH, Derschen
 BECK GmbH & CO, Nürnberg
 BEHA, Glottertal
 Best Power Technology, Erlangen
 Beta Layout, Arbergen
 Binder Elektronik GmbH, Sinsheim
 Binder Magnete, Villingen-
 Schwenningen
 biw Isolierstoffe GmbH, Enneptal
 Blaessinger, Stuttgart
 Böllhoff GmbH, Winnenden
 Börsig GmbH, Neckarsulm
 Bohnenstiel, Heidelberg
 Bubenzer Bremsen, Kirchen-
 Wehrbach
 Buerma Werner Machauer KG,
 Stuttgart
 BueroMix, Mannheim
 Bürklin OHG, München
 C&D Technologies (Datel) GmbH,
 München
 C&K Components, Neuried b.
 München
 Cancom Frankfurt, Bad Homburg
 Cargopack, Mannheim
 CAB, Karlsruhe
 CAMCenter GmbH
 CAP CNC+Coating Technik, Zell.
 a. H.
 C. Bruno Bayha GmbH, Tuttlingen
 Cadillac-Plastic, Viernheim
 Carl Roth, Karlsruhe
 Carl Zeiss 3D Automation GmbH
 Carl Zeiss, Optronics GmbH
 Caspar Gleidlager GmbH
 CEF, Heidelberg
 Cherry Mikroschalter, Auerbach
 Christiani, Konstanz
 Clear Screen (CLS), Mannheim
 Coating-Plast, Schriesheim
 Com Pro, Stuttgart
 Compumess Elektronik,
 Unterschleissheim
 ComputaCenter, Kerpen-Sindorf
 Comtronic GmbH,
 Heiligkreuzsteinach
 Conrad Electronic GmbH, Hirschau
 Contag GmbH, Berlin
 Creasco GmbH, Gilching
 Cryophysics, Darmstadt
 Dannewitz, Linsengericht
 db electronic Daniel Böck GmbH,
 Ehringshausen
 DDC Elektronik GmbH, München
 DELL-Computer GmbH, Frankfurt
 Delta-V, Wuppertal
 Deltron Components GmbH, Neuried
 b. München
 Deti, Meckesheim
 Digi-Key, Enschede
 Diconite U.T.E Pohl GmbH
 DMG-Service, Pfronten
 DPV Elektronik Service GmbH,
 Eppingen
 druckerDruck, Bietigheim
 Dürkes & Obermayer GmbH,
 Edingen-Neckarhausen
 Dyna Systems NCH, Mörfelden-
 Walldorf
 e2v, Gröbenzell
 EBARA Pumpen, Dietzenbach
 EBJ, Ladenburg
 EBV-Elektronik, Leonberg
 EC Motion, Mönchengladbach
 Edsyn Europa, Kreuzwertheim
 EFH, Neidenstein
 Eldon, Büttelborn
 Electronic Product Services Li,
 Düsseldorf
 electronic sensor+resistor Gmb,
 Ottobrunn
 Elektronikentwicklung und Daten-
 verarbeitung (EDO), Hockenheim
 Elna Transformatoren, Sandhausen
 elspec, Geretsried
 ELV Elektronik, Leer
 EM TEST GmbH, Kamen
 Engineering Design Team, USA,
 Beaverton
 ERNI Electronics GmbH, Adelberg
 ERSA GmbH, Wertheim
 eurodis Enatechnik, Quickborn
 Euromicron GmbH, Mittenaar 3
 Europa-Lehrmittel, Verlag
 Eurostor, Filderstadt
 EWF, Eppingen
 Faber Industrietechnik GmbH,
 Mannheim
 Fairchild Imaging, Miltitas, USA
 Farben Specht, Bammental
 Farnell GmbH, Oberhaching
 Farnell Electronic Services,
 Möglingen
 Farnell in One, Deisenhofen
 Faulhaber GmbH & Co KG,
 Schönaich
 FCT Electronic, München
 Fels Spedition, Heidelberg
 Fisba, St. Gallen
 Fischer Elektronik GmbH & Co.,
 Lüdenscheid
 FlowCAD EDA-Software Vertrieb,
 Feldkirchen
 Fluke Deutschland GmbH, Fellbach
 FPS-Werkzeugmaschinen GmbH,
 Otterfingv
 Frank GmbH Frank GmbH
 Franke, Aalen
 Fresemann Andreas
 Fritz Faulhaber, Schönaich
 Future Electronics Deutschland,
 Unterföhring
 GAD GmbH
 Ganter, Walldorf
 Gehrckens C. Otto GmbH, Pinneberg
 Geier Metall-u. Stahlhandel,
 Mannheim
 Genoma Normteile, Hameln
 Gerwah Präzision GmbH
 GFI Elektro GmbH, Heidelberg
 Glenair Electronic GmbH, Steinbach
 GLT, Pforzheim
 Göbel, Horst, Ludwigshafen
 Goodfellow
 Gould Nicolet Meßtechnik,
 Dietzenbach
 Grandpair, Heidelberg
 Grulms-Pneumatik, Grünstadt
 GRW, Würzburg
 Gummi Körner, Eppelheim
 Gummi-Plast Schild, Gernsheim
 Gutekunst, Pfalzgrafenweiler
 Häcker, Weinsberg
 Häfele Leiterplattentechnik,
 Schrießheim
 Hahn u. Kolb GmbH, Stuttgart
 Handelsvertretung Schaffland,
 Leverkusen
 Hasberg Schneider GmbH, Bernau/
 Chiemsee
 Heidenhain Dr. Johannes GmbH,
 Traunreut
 Helukabel GmbH, Hemmingen
 Hema, Mannheim
 Herz, Leister Geräte, Neuwied
 Heuser GmbH, Heidelberg
 Hewlett-Packard Direkt GmbH,
 Böblingen

- Hilger und Kern, Mannheim
 Hilma-Römheld GmbH, Hilchenbach
 HKI GmbH, Weinheim
 HM Industrieservice, Waghäusel
 Hoffmann, München
 Hoffmann Nürnberg GmbH, Nürnberg
 Hommel-Hercules Werkzeughandel,
 Viernheim
 Hormuth, Heidelberg
 Horn, Stutensee
 Horst Göbel, Ludwigshafen
 Horst Pfau, Mannheim
 HOT Electronic, Taufkirchen
 HTF Elektro, Mannheim
 Huber+Suhner GmbH, Taufkirchen
 Hummer+Rieß, Nürnberg
 Igus GmbH, Köln
 IBF Mikroelektronik, Oldenburg
 Ineltek, Heidenheim
 Infrared Labs, Tucson
 Ingenieurbüro Steinbach, Jena
 Inkos, Reute i.Breisgau
 Invent GmbH
 iSystem, Dachau
 Ixxat Automation GmbH, Weingarten
 Jacobi Eloxal, Altlussheim
 Jarmyn, Limburg
 Joisten+Kettenbaum, Bergisch
 Gladbach
 Jumo GmbH & Co. KG, Fulda
 JS-Gruppe, Hamburg
 Kaiser+Kraft GmbH
 Kaufmann, Crailsheim
 KDM Ingenieurbüro, Brombachtal
 Kerb-Konus-Vertriebs-GmbH,
 Amberg
 Kniel GmbH, Karlsruhe
 Knürr AG, Arnstorf
 Knürr, München
 Koco Motion GmbH, Dauchingen
 Koelblin-Fortuna-Druck, Baden
 Baden
 Kurt Norr & Co
 KVT Canespa, Langenhagen
 Labelident GmbH, Schweinfurt
 Laflo Reinraumtechnik GmbH
 Lagra Elektrotechnik GmbH,
 Neckargemünd
 Lambda Electronics, Achern
 Lapp Kabel GmbH, Stuttgart
 Laser Components
 Layher, Güglingen
 Lehner Elektrotechnik, Birkenheide
 Lemo Elektronik, München
 Lemo Elektronik GmbH, München
 Leunig GmbH, Leinfelden-
 Echterdingen
- Lineartechnik, Korb
 Linux Land, München
 LPKF CAD/CAM Systeme, Garbsen
 LWS-Technik GmbH & Co.
 Macrotron, München
 Mädler, Stuttgart
 Mankiewicz, Hamburg
 Master-productions GmbH, Aystetten
 MathWorks, Ismaning
 Matsuo Electronics Europe, Eschborn
 Matsushita Automation, Holzkirchen
 Max Computer GmbH, Schönberg
 Maxim GmbH, Planegg
 Meilhaus Electronic GmbH,
 Puchheim
 MemeC Express, Unterhaching
 Menges electronic, Dortmund
 Mentor, Erkrath
 Metabowerke GmbH, Nürtingen
 Metrofunkkabel-Union GmbH, Berlin
 Mitsubishi-Electric, Weiterstadt
 Mobotix AG, Kaiserslautern
 Mönninghoff, Bochum
 Moll, Bleche und Verarbeitung,
 Hirschberg
 Moxa Europe GmbH,
 Unterschleissheim
 MSC Vertriebs GmbH, Stutensee
 MTI GmbH, Baden-Baden
 MTS Systemtechnik GmbH,
 Mertingen
 Müller Elektronik, Friedrichshafen
 Munz, Lohmar
 Mura Metallbau, Viernheim
 Nanotec, Finsing
 Neolab Laborbedarf, Heidelberg
 Newport, Darmstadt
 Nickel Schalt- und Messgeräte,
 Villingen-Schwenningen
 Niedergesess, Sandhausen
 Nies Elektronik GmbH, Frankfurt
 Noesse Datentechnik, Leverkusen
 Noor, Viernheim
 Nova Elektronik, Pulheim
 Oberhausen, Ketsch
 OpenStorage, Wiesbaden
 Otto Faber, Mannheim
 Otto Ganter, Furtwangen
 Orglmeister
 Owis GmbH, Staufen
 Oxford Instruments GmbH,
 Wiesbaden
 Parametric Technology, München
 Parcom, CH-Flurlingen
 pbe Electronic, Elmshorn
 PCE Group oHG
 Pfeiffer Adolf GmbH, Mannheim
- Pfister Büro
 Phoenix Contact GmbH & Co.,
 Blomberg
 Pro~Com, Eislingen
 Physik Instrumente GmbH, Karlsruhe
 Phytex Messtechnik, Mainz
 Phyttron, Gröbenzell
 Plastipol, Runkel
 Prout Services+Hardware GmbH,
 Darmstadt
 PSC, Saarbrücken
 PSI Tronix, Tulare, California, USA
 Pühl A. GmbH
 Püschel Elektronik, Mannheim
 Quarzglas-Heinrich, Aachen
 Regional Electronic Distribution,
 Rodgau-Jügesheim
 Radiall, Rödermark
 Räder Gangl, München
 Rala, Ludwigshafen
 Rau-Meßtechnik, Kelkheim
 Reeg, Wiesloch
 Reichelt Elektronik, Sande
 Reinhold Halbeck, Offenhausen
 Rexel Deutschland HTF, Mannheim
 Reith, Mannheim
 Riekert & Sprenger, Wertheim
 Retronic, Ronneburg
 Rexim, Maulbronn
 Riegler & Co. kG
 Riekert & Sprenger, Wertheim
 Rittal GmbH+Co. KG, Herborn
 Roland Häfele Leiterplattentechnik,
 Schriesheim
 Roth Carl GmbH & Co.KG, Karlsruhe
 RS Components GmbH, Mörfelden-
 Walldorf
 RSP GmbH, Mannheim
 Rütgers, Mannheim
 Rudolf, Heidelberg
 RUF Elektrohandel GmbH & Co.KG,
 Mannheim
 Rufenach Vertriebs-GmbH,
 Heidelberg
 Scantec GmbH, Germering
 Schaffner Elektronik, Karlsruhe
 Schlossmacher Ingenieurbüro
 Schrauben-Jäger AG
 Schraubenladen, Villingen-
 Schwenningen
 Schroff GmbH, Straubenhardt
 Schuricht Distrelec GmbH, Bremen
 Schulz Bürozentrum GmbH
 Schuricht, Fellbach-Schmiden
 Schwab Holz-Zentrum
 Schweizer Elektroisierungsstoffe,
 Mannheim

SCT Servo Control Technology, Tanusstein	Stöhr Armaturen, Königsbrunn	TS-Optoelectronic, München
SE Spezial-Electronic AG, Bückeburg	StraSchu Leiterplatten GmbH, Oldenburg	TWK-Elektronik, Karlsruhe
Seifert mtm Systems, Ennepetal	Suco-Scheuffele, Bietigheim- Bissingen	Vacuumschmelze, Hanau
Segor Electronics GmbH, Berlin	Synatron, Hallbergmoos	VBE Baustoff+Eisen, Heidelberg
Seifert mtm Systems, Ettlingen	Tandler, Brauen	Vereinigte Baustoff-und Eisen GmbH
SEW Eurodrive, Bruchsal	Tautz GmbH, Gladbeck	Vero Electronics, Bremen
Siegburg Spectra Computersysteme GmbH	Teldix GmbH, Heidelberg	Vision Engineering LTD, Emmering
Siemens IC-Center, Mannheim	Team Arrow, Untereisesheim	Vision Systems GmbH, Norderstedt
Sigmann Elektronik GmbH, Hüffenhardt	Teseq GmbH, Berlin	W. & W. Schenk, Maulbronn
SolidLine AG, Wiesbaden	THK, Düsseldorf	Wamser Buero Service, Mannheim
Spaeter, Viernheim	Thorlabs, Grünberg	Werner Bauer GmbH & Co., Heilbronn
Spezial Elektronik AG, Bückeburg	ThyssenKrupp Schulte	Wiesemann u. Theis GmbH, Wuppertal
Sphinx, Laudenbach	TMS Test- und Meßsysteme, Herxheim/Hayna	Wietholt Heinrich GmbH
Sphinx Connect GmbH, Stuttgart	TopCart, Erzhausen	Wikotec, Bramsche
Spindler & Hoyer, Göttingen	Tower Electronic Components, Schriesheim	Wilhelm Gassert, Schriesheim
Spoerle Electronic, Dreieich	transtec AG, Tübingen	WS CAD Elektronik, Berk Kirchen
Stahlschlüssel Wegst GmbH	Trivint AG, Ravensburg	Witter GmbH, Heidelberg
Steinbach M. Ingenieurbüro		WIKI, Klingenberg
		Würth Elektronik GmbH & CO. KG, Künzelsau
		Yamaichi Electronics, München

Tagungen, Vorträge

Veranstaltete Tagungen

Tagungen des MPIA:

- LBTO Meeting »LINC-NIRVANA and LBT software development«, MPIA, 24. – 25. Januar (Martin Kürster)
- LBT and LINC-NIRVANA Software Delta Design Review, MPIA, 31. Januar (Martin Kürster)
- 4th MPIA Student Workshop, 24. – 31. März, Dorio, Lago di Como (Martin Hennemann, Jutta Stegmaier, Florian Rodler)
- LINC-NIRVANA consortium meeting, Padua, 28. – 29. März (Martin Kürster)
- Calar Alto Colloquium, MPIA, 2. – 3. Mai (Klaus Jäger)
- Meeting zum »Jahr der Astronomie 2009«, MPIA, 9. und 10. Mai (Jakob Staude)
- LBTO Meeting »LINC-NIRVANA and LBT software development«, MPIA, 10. – 11. Mai (Martin Kürster)
- Workshop »LBT Laser Guide Stars«, MPIA, 12. – 13. Mai (Wolfgang Gässler)
- Workshop »The Impact of AGN Feedback on Galaxy Formation« 20. – 26. Mai, Schloss Ringberg (Rachel Somerville, Klaus Meisenheimer, Hans-Walter Rix, Fabio Fontanot, Andrea Macciò)
- THINGS meeting, Hirschhorn, Mai (Fabian Walter)
- Blockvorlesung: »The Hydrodynamics of Young Circumstellar Disks« MPIA, 11. – 12. Juni (Richard H. Durisen, Indiana University)
- Workshop »Chemistry in Disks«, MPIA, 4. – 5. Juli (Dmitri A. Semenov)
- LINC-NIRVANA meeting on flexure tracking (1) and on assembly, integration and tests, MPIA, 11. – 13. Juli (Martin Kürster)
- Konferenz »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli (LOC: Eric Bell, Anna Pasquali, Jochen Heidt (Vorsitz), Hans Hippelein, Klaus Jäger, Hans-Walter Rix, Christian Tapken; SOC: Klaus Meisenheimer, Somerville und andere)
- SPITZER Workshop, Heidelberg, 18. – 20. Juli (Jeroen Bouwman, Thomas Henning)
- IMPRS Summerschool »The Milky way Galaxy«, Heidelberg, 29. August – 5. September (Christian Fendt)
- LINC-NIRVANA topical meeting on flexure tracking (2), MPIA, 4. September (Martin Kürster)
- Konferenz »Massive Star Formation: Observations confront Theory«, Heidelberg, 10. – 14. September, (Henrik Beuther, Thomas Henning, Maria Jannssen-Bennynck, Stefan Brinkmann, Cassie Falscheer, Maiken Gustafsson, Martin Hennemann, Thomas Henning, Hendrik Linz, Frank Richter, Boyke Rochau, Javier Rodon, Fylke Schmidt, Jürgen Steinacker)
- Erweiterter Fachbeirat, MPIA, 8. – 9. Oktober (Klaus Jäger)
- LINC-NIRVANA consortium meeting, MPIA, 15. – 16. Oktober (Martin Kürster)
- MIRI European Consortium Meeting CD Nr. 10, MPIA, Heidelberg, 24. – 26. Oktober (Oliver Krause)

- Ringberg Konferenz »Astronomy with Laser Guide Star, Adaptive Optics«, Schloss Ringberg, 29. Oktober – 2. November (Wolfgang Brandner, Thomas Henning, Hans-Walter Rix, Stefan Hippler)
- European Workshop NanoLum VII, Laboratory Astrophysics Group of the MPIA at the FSU Jena, November 5. – 6. (Friedrich Huisken)
- STAGES workshop, MPIA, 5. – 7. November (Eric Bell and Anna Gallazzi)
- Retreat of the Galaxies and Cosmology Department, Schloss Ringberg, 3. – 6. Dezember (Jelte de Jong und andere)
- External retreat des WBK, Edesheim, 10. – 11. Dezember (Klaus Jäger)
- Andere veranstaltete Tagungen:*
- Coryn Bailer-Jones: Second Meeting of the GAIA Data Processing and Analysis Consortium Coordination Unit 8 (Astrophysical Parameters), Uppsala, 14. – 15. Juni (Vorsitz); Third meeting of the GAIA Data Processing and Analysis Consortium Coordination Unit 8 (Astrophysical Parameters), Athen, 13. – 14. Dezember (Vorsitz)
- Eric Bell: »A New Zeal for Old Galaxies«, New Zealand, März (SOC); »Formation and Evolution of Galaxy Disks«, Rom, 1. – 5. Oktober (SOC)
- Thomas Henning: DARWIN Meeting, Orsay, 6. – 7. Dezember
- Ralf Launhardt: IAU Symposium 248 »A Giant Step: from Milli- to Microarcsecond Astrometry«, Shanghai, 15. – 19. (SOC)
- Anders Johansen: Pencil Code User Meeting 2007, Stockholm, 14. – 17. August
- Eva Schinnerer: 4th SPITZER Science Konferenz »The Evolving ISM in the Milky Way and Nearby Galaxies«
- Jürgen Steinacker: ESO workshop »12 Questions on Star and Massive Star Cluster Formation«, Garching, 3. – 6. Juli (SOC)
- Fabian Walter: splinter meeting »The Evolution of the ISM through Cosmic Times«, Annual Meeting of the AG, Würzburg, September

Teilnahme an Tagungen, Fachvorträge, Poster

- M. Arnold: International Conference on Molecules in Space & Laboratory, Paris, 14. – 18. Mai (Poster)
- C. Bailer-Jones: 2nd GAIA Data Processing and Analysis Consortium Executive Meeting, Brüssel, 26. – 27. Januar; Konferenz »Data analysis, machine learning and applications«, Freiburg, 7. – 9. März (Vortrag); 3rd GAIA Data Processing and Analysis Consortium Executive meeting, Heidelberg, 17. – 18. Mai; Konferenz »Astronomical Data Analysis Software and Systems«, London, 23. – 26. September (Vortrag, drei Poster); 4th GAIA Data Processing and Analysis Consortium Executive Meeting, Torino, 1. – 2. Oktober
- E. Bell: German-Israeli Foundation Network on Galaxies Workshop, 11. – 16. April; STAGES collaboration meetings, Nottingham, 18. – 20. Juni, MPIA, 5. – 7. November, Pan-STARRS collaboration meeting, Baltimore, 30. Juli – 2. August
- Stephan Birkmann: Konferenz »Massive Star Formation«, 10. – 14. September, MPIA, Heidelberg; JWST Partner Workshop, 11. – 12. Juni, Dublin; SPIE Optics and Photonics, San Diego, California, 26. – 30. August (Vortrag)
- Kris Blindert: »Tracing Cosmic Evolution with Clusters of Galaxies: Six Years Later« Sesto Italy, 25. – 29. Juni (Vortrag); »Galaxy Growth in a Dark Universe« Heidelberg, 16. – 20. Juli (Vortrag)
- Steve Boudreault: Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft, Würzburg, 24. – 28. September (Poster)
- Jeroen Bouwman: PACS Consortium Meeting no. 29, MPE, Garching, 19. Januar; PSF group Workshop, Dornburg/Jena, 14. – 17. Oktober (Vortrag); 5th Planet Formation Workshop, Braunschweig, 19. – 21. September (Vortrag); PACS Consortium Meeting no. 31, MPE, Garching, 7. – 9. November; Workshop 'Environnement des systemes stellaires jeunes', UJF, Grenoble, 5. Dezember (Vortrag)
- José Caballero: II. Workshop AstroCAM, Jóvenes astrofísicos de la Comunidad de Madrid, Villaviciosa de Odón, Madrid, 19. – 21. September (Poster)
- Andres Carmona Gonzalez: The 24th. Jerusalem Winter School in Theoretical Physics: The Lives of Low-mass Stars and their Planetary Systems, Jerusalem, 27. Dezember – 5. Januar (Vortrag); VLTI Summer School on Circumstellar Discs and Planets at Very High Angular Resolution, Porto, 28. Mai – 8. Juni (Poster); IAU Symposium 249 »Exoplanets: Detection, Formation and Dynamics«, Suzhou, China 22. – 26. Oktober (Poster)
- Helmut Dannerbauer: Konferenz: »The origin of galaxies: exploring galaxy evolution with the new generation of infrared-millimetre facilities«, Obergurgl, 24. – 29. März (Vortrag); PACS Consortium Meeting no. 30, IFSI, Frascati, Italy, 6. – 7. Juli; Konferenz: »From IRAS to Herschel/Planck: Cosmology with infrared and sub-millimetre surveys«, London, 9. – 11. Juli; Konferenz: »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli (Poster); AG Tagung, Würzburg, 24. – 28. September (Poster); MIRI European Consortium Meeting CD no. 10, MPIA, Heidelberg, 24. – 26. Oktober
- Jelte de Jong: SDSS collaboration meeting, Philadelphia, 29. März – 1. April (Vortrag); Konferenz »The Milky Way Halo – Stars and Gas«, Bonn, 29. Mai – 2. Juni (Vortrag)
- Cornelis Dullemond: Konferenz »Structure formation in the Universe«, Chamonix, Mai (Vortrag); Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft, Würzburg, September; Planet Formation Workshop, September (Vortrag)

- Sebastian Egner: Workshop »Science with Laser Guide Stars«, 28. Oktober – 2. November, Ringberg Castle (Vortrag); Seeing Symposium, 22. März, Mauna Kea Weather Center, Kona, Hawaii (Poster)
- Christian Fendt: IAU Symposium 243: »Star-Disk Interaction in Young Stars«, Grenoble, Mai; Workshop: »MHD disk winds, jets, outflows« (JETSET meeting) Heidelberg, 30. – 31. März; IMPRS-Koordinatorentreffen, München, 25. – 26. Oktober
- Fabio Fontanot: Workshop »Galaxy Formation«, Jerusalem, 11. – 16. April (Vortrag); Ringberg Workshop »The Impact of AGN feedback on Galaxy Formation«, 20. – 26. Mai (Vortrag); X-ray 07 »Evolution of Accretion, Star Formation and Large Scale Structure«, Rhodos, 2. – 6. Juli (Vortrag); Konferenz »Galaxy growth in a Dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli (Vortrag)
- Wolfgang Gässler: LBT Software Workshop, Florenz, 1.–2. Oktober
- Anna Gallazzi: STAGES collaboration meeting, University of Nottingham, Nottingham, 18. – 20. Juni (Vortrag); Konferenz »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli (Poster)
- Dimitrios Gouliermis: Herschel Open Time Key Program workshop, ESTEC, Noordwijk, 20. – 21. Februar (Poster); 41st ESLAB Symposium: »The Impact of HST on European Astronomy«, ESTEC, Noordwijk, 29. Mai – 1. Juni (Poster); ESO Workshop: »12 Questions on Star and Massive Star Cluster Formation«, Garching, 3. – 6. Juli (Vortrag); IAU Symposium No. 246: »Dynamical Evolution of Dense Stellar Systems«, Capri, 5. – 9. September (Vortrag); Konferenz »Massive Star Formation: Observations Confront Theory«, Heidelberg, 10. – 14. September (Poster); Planet and Star Formation Group Workshop, Dornburg Castle, Jena, 14. – 17. Oktober (Poster); Galaxies and Cosmology Department Retreat, Schloss Ringberg, 3. – 6. Dezember (Vortrag)
- Roland Gredel: Opticon board meeting, Venedig, 4. – 6. März; Workshop »Site Testing at Dome C«, Rom, 11. – 13. Juni; Marie-Curie Training Network Meeting, Eastern European Enhancement, Bucharest, 20. – 23. Juni (Vortrag); Opticon Mid-Term Review, Corfu, 7. – 11. September; Workshop »The Astrophysical Science Cases at Dome C«, Potsdam, 17. – 18. September (zwei Vorträge); Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft in Würzburg; 24. – 26. September (Vortrag); ARENA Mid-Term Review, Bruxelles, 22. Oktober; ARENA CMC Meeting, Paris, 14. Dezember
- Maiken Gustaffson: Konferenz »Structure formation in the Universe«, Chamonix, 27. Mai – 1. Juni; »Massive star formation: Observations confront theory«, Heidelberg, 10. – 14. September (Poster)
- Martin Hennemann: Konferenz »Massive Star Formation«, MPIA, 10. – 14. September (Poster); AG Tagung, Würzburg, 24. – 28. September (Poster); PSF-Workshop, Jena, 14. – 17. Oktober (Vortrag); MIRI EC Meeting, MPIA, Heidelberg, 24. – 26. Oktober
- Boris Häußler: MPIA Students workshop, Doria (Vortrag); STAGES workshop, Nottingham, 18. – 20. Juni (Vortrag)
- Stefan Hippler: Konferenz »Astronomy with Laser Guide Star Adaptive Optics«, Ringberg Castle, 29. Oktober – 2. November (Poster); GRAVITY consortium meetings, z. B. GRAVITY Phase-A Review Meeting, ESO, Garching, 5. – 6. September; PSF Department Meeting, Jena, 15. – 16. Oktober (Vortrag)
- Klaus Jäger: Calar Alto Colloquium, MPIA, 1. – 2. Mai; MPG-EU-Seminar (McCarthy) 15. – 16. Mai; Konferenz »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli
- Knud Jahnke: MPG SNWG Selection Seminar, Garching, 6. März (Vortrag); Konferenz »The Impact of AGN feedback on galaxy formation«, Schloss Ringberg, 20. – 26. Mai; COSMOS meeting New York, 11.–14. Juni (Vortrag); STAGES project meeting Nottingham, 18. – 20. Juni (Vortrag); Konferenz »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli (2 Poster)
- Viki Joergens: Konferenz »Multiplicity in Star Formation«, Toronto, 16. – 18. Mai (Vortrag); Konferenz »Extreme Solar Systems«, Santorini, 25. – 29. Juni (Vortrag); 3rd PSF group workshop, Jena/Dornburg, 14. – 17. Okt. (Vortrag)
- Anders Johansen: »From Stars to Planets«, Gainesville, April (Vortrag); PSF Workshop, Jena, Oktober (Vortrag)
- Ulrich Klaas: PACS Consortium Meeting no. 29, MPE, Garching, 19. – 21. Januar; PACS Consortium Meeting no. 30, IFSI, Frascati, 6. – 7. Juli; PACS Consortium Meeting no. 31, MPE, Garching, 7. – 9. November
- Hubert Klahr: Konferenz »From Stars to Planets«, Gainesville, FL, 14. April (Vortrag); 5th Planet Formation Workshop, Braunschweig, 20. – 22. September (Vortrag)
- Rainer Klement: 37th Saas-Fee Advanced Course of the Swiss Society for Astrophysics and Astronomy: The Origin of the Galaxy and Local Group Mürren, Schweiz, 4. – 10. März; Konferenz: Galaxy Growth in a Dark Universe, Heidelberg, 16. – 20. Juli; IMPRS Summer School: The Milky Way Galaxy, Heidelberg, 29. August – 5. September; GC Department Retreat, Schloss Ringberg, 3. – 6. Dezember (Vortrag)
- Kirsten K. Knudsen: ASTRON-Seminar, Dwingeloo, Netherlands, Januar; Konferenz »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg, Juli (Poster)
- Sergey Koposov: SEGUE Meeting, Philadelphia, 31. März – 1. April (Vortrag); SDSS II Collaboration meeting, Philadelphia, 29. – 31. März (Vortrag); Symposium »Galaxies in the Local Volume« Sydney, 8. – 13. Juli (Vortrag); Workshop »The Globular Clusters – Dwarf Galaxies Connection«, Ann Arbor, 27. – 29. August (Vortrag)
- Oliver Krause: PACS Consortium Meeting no. 30, IFSI, Frascati, 24. – 25. Mai; MIRI European Consortium Meeting no. 9, ASTRON, Dwingeloo, 4. – 6. Juni; JWST Partner Workshop, 11.–12. Juni, Dublin; Space Cryogenics Workshop, Cryogenic Society of America, Huntsville/USA, 11.–13. Juli; Konferenz »Massive Star Formation«, 10. – 14. September, Heidelberg (Poster); Astrophysics in the Next Decade, Marriott, Tucson, 24. – 28. September (Poster); MIRI European Consortium Meeting, MPIA, 24. – 26. Oktober; SPIE Optics and Photonics, San Diego, California, 26. – 30. August

- Jaron Kurk: »Obscured AGN Across Cosmic Time«, Seeon, 5. – 8. Juni (Vortrag); »Galaxy growth in a Dark Universe« Heidelberg, 16. – 20. Juli (Vortrag); »Panoramic Views of Galaxy Formation and Evolution« Hayama, Japan, 11.–16. Dezember (Vortrag)
- Martin Kürster: LBT splinter meeting, Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft, Würzburg, 24. – 28. September
- Ralf Launhardt: Workshop »Multiplicity in Star Formation«, Toronto, 16. – 18. Mai (Vortrag); IAU Symposium 248 »A Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry« Shanghai, 15. – 19. Oktober (Vortrag); IAU Symposium 249 »Exoplanets: Detection, Formation and Dynamics«, Suzhou, 22. – 26. Oktober (Vortrag)
- Dietrich Lemke: Mond Symposium, DGLR Bremen, 14. – 16. März; JWST Partner Workshop, 11.–12. Juni, Dublin; MIRI Steering Committee Meeting, Heidelberg, 27. Juni; AG Tagung, Würzburg, 24. – 28. September (Poster); European Space Cryogenics, ESTEC, Noordwijk, 27. – 30. November (Vortrag)
- Rainer Lenzen: Gravity Meeting, MPE Garching, 13. März; E-ELT mid term review meeting, ESO Garching, 14. März; ARENA Konferenz, Tenerife, 26. – 28. März; Gavity kick-off meeting, Garching 2. – 3. Mai; DUNE-meeting, Bonn, 5. – 6. Juni; MIDIR-meeting, Leiden, 29. – 30. August; GRAVITY-meeting, MPE Garching, 5. – 6. September; PSF-meeting, Jena, 15. – 17. Oktober; PanStarrs Review, Honolulu and Maui, 1.–2. November; PANIC Preliminary Design Review, IAA Granada, 21.–22. November
- Hendrik Linz: Konferenz »Massive Star Formation: Observations confront theory«, Heidelberg, 10. – 14. September (Vortrag)
- Nicolas Martin: Workshop »Astronomical Probes of the Nature of Dark Matter«, Irvine (USA), 22. – 24. März (Vortrag); Konferenz »The Milky Way Halo-Stars and Gas«, Argelander Institut für Astronomie, Bonn, 29. Mai – 2. Juni (Vortrag); Workshop »The Globular Cluster – Dwarf Galaxy connection«, Ann Arbor (USA), 27. – 29. August (Vortrag); International Max Planck Research School 2007 »The Milky Way Galaxy: Dynamics, Evolution, Matter Cycle«, Heidelberg, 29. August – 5. September (Vortrag)
- Eva Meyer: MPIA Student Workshop, Lago di Como, Italy, 24. – 31. März (Vortrag); 11th Vatican Observatory Summer School, Castel Gandolfo, Italy, 10. Juni–6. Juli, (Vortrag); PSF Meeting, Jena, 15. – 17. Oktober
- Friedrich Müller: ESMATS– The European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 19. – 21. September, ESTL, Liverpool/UK (Poster)
- Nadine Neumayer: Konferenz »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli
- Marie-Helene Nicol: Calar Alto Colloquium, MPIA, 1. – 2. Mai; »Galaxy growth in a dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli (Poster); STAGES Workshop, MPIA, 5. – 9. November (Vortrag); Galaxy and Cosmology group retreat, Schloss Ringberg, 3. – 7. Dezember (Vortrag); The 1st Subaru International Conference 2007 »Panoramic Views of Galaxy Formation and Evolution«, Shonan Village, Japan, 11. – 16. Dezember (Poster)
- Markus Nielbock: Konferenz »Massive Star Formation«, 10. – 14. September, MPIA, Heidelberg (Poster)
- Dominik A. Riechers: 209th Meeting of the American Astronomical Society, Seattle, 5. – 10. Januar (PhD Vortrag); COSMOS Collaboration Meeting, American Museum of National History, New York, 11. – 14. Juni; Konferenz »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli (Poster)
- Hans-Walter Rix: »HST's cosmological imaging surveys«, HST Symposium, Norwijk, Niederlande, 30./31. Mai (Vortrag)
- Florian Rodler: Extreme Solar Systems Konferenz, Santorini, Juni (Poster); PSF workshop, Jena, Oktober (Vortrag)
- G. Rouillé: International Conference on Molecules in Space & Laboratory, Paris, 14. – 18. Mai (Vortrag)
- Christine Ruhlmann: 4th MPIA Student Workshop, 24. – 31. März, Dorio, Lago di Como (Vortrag); Konferenz »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli (Poster); IMPRS Summer School »The Milky Way Galaxy«, Heidelberg, 29. August – 5. September; 6th NEON Observing School, Asiago, 4. – 17. September (Vortrag); STAGES Workshop, Heidelberg, 5. – 7. November; Galaxies and Cosmology Department Retreat, Schloss Ringberg, 3. – 6. Dezember (Vortrag)
- Marc Schartmann: Workshop »Obscured AGN Across Cosmic Time«, Kloster Seeon, 5. – 8. Juni; AG Tagung Würzburg, 24. – 29. September (Vortrag)
- Silvia Scheithauer: PSF Workshop, 14. – 17. Oktober, Jena (Vortrag); RADECS Konferenz, 10. – 14. September, Deauville/France (Poster); The European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 19. – 21. September, ESTL, Liverpool/UK (Poster)
- Eva Schinnerer: Herschel Open Time Key Program Workshop, Noordwijk; COSMOS Team Meeting, New York; »Frontiers of Astrophysics: A Celebration of NRAO's 50th Anniversary«, Charlottesville, USA (Poster); IAU Symposium 245: »Formation and Evolution of Galaxy Bulges«, Oxford, UK (Vortrag); ESO ALMA community day, Garching (Vortrag); Workshop »Gas Accretion and Star Formation in Galaxies«, Garching (Poster); AG Tagung, Würzburg, LBT Splinter Meeting (Vortrag)
- Markus Schmalzl: Konferenz »Massive Star Formation: Observations confront Theory«, Heidelberg, 10. – 14. September (Poster)
- Dmitri A. Semenov: Workshop »Chemistry in Disks«, Bordeaux, 31. Januar – 3. Februar (Vortrag); Konferenz »Molecules in Space and Laboratory«, Paris, 14. – 18. Mai, (Vortrag und Poster); Workshop »Transformational Science with ALMA«, Charlottesville, 22. – 24. Juni (Poster); PSF meeting in Jena, 10. – 12. Oktober (Vortrag)
- Kester W. Smith: GfKI Meeting, Freiburg, März 7. – 9. (Vortrag); Milky Way Halo meeting, Bonn, 29. Mai – 2. Juni (Poster); ADASS, London, 23. – 26. September (Poster)
- Jutta Stegmaier: RADECS Konferenz, 10. – 14. September, Deauville/France (Poster); DGLR Symposium »To the

Moon and beyond«, Bremen, 14. – 16. März; SPIE Optics and Photonics, San Diego, California, 26. – 30. August
 Jürgen Steinacker: 7th AstroGrid-D Workshop, Technische Universität München, Garching, 12. Juni (Vortrag)
 Christian Tapken: Konferenz »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli (Poster); Lyman-alpha Workshop, Paris, Oktober (Vortrag)
 Robert Tubbs: VLTI training school »Circumstellar disks and planets at very high angular resolution«, Porto, Portugal, 28. Mai – 8. Juni (Vortrag, Poster); IAU Symposium 248 »A

Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry«, Shanghai, PR China, 15. – 19. Oktober (Poster); IAU Symposium 249 »Exoplanets: Detection, Formation and Dynamics«, Suzhou, China, 22. – 26. Oktober (Poster)
 Fabian Walter: Meeting of the DFG Priority Program, Bad Honnef, January; »HERSCHEL Open Time Key Projects«, Noordwijk, Februar; NRAO User's Committee meeting, Charlottesville, Mai; Pan-STARRS meeting, Baltimore, Juli; »ALMA Community day/ALMA surveys«, Garching, September

Eingeladene Vorträge, Kolloquien

Coryn Bailer-Jones: 2nd Heidelberg Astronomy Summer School, Heidelberg, September (eingeladener Vortrag)
 Eric Bell: »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli (eingeladener Vortrag); »Formation and Evolution of Galaxy Disks«, Rome, 1. – 5. Oktober (eingeladener Vortrag); University of Strasbourg, 19. Oktober (eingeladener Vortrag); University of Leiden, 15. November (eingeladener Vortrag); University of Wisconsin, 31. Oktober (eingeladener Vortrag)
 Hendrik Beuther: Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft, Würzburg, September (Biermann-Preis-Vortrag); Workshop »Star Formation Through Cosmic Time«, Santa Barbara Kavli Institute for Theoretical Physics (eingeladener Vortrag)
 Joe Carson: NASA Ames, November (eingeladener Vortrag)
 Sebastian Egner: SUBARU Telescope, Hilo, Hawaii, 11. Dezember (eingeladener Vortrag)
 Christian Fendt: Konferenz »High Energy Phenomena in Relativistic Outflows«, Dublin, 24. – 28. September (eingeladener Übersichtsvortrag); EAS Symposium No. 3 »Violent Phenomena in Young Stars«, Yerevan, August (eingeladener Übersichtsvortrag); IAU Symposium 243: »Star-Disk Interaction in Young Stars«, Grenoble, Mai (eingeladener Übersichtsvortrag); JETSET School and Workshop »Numerical MHD and Instabilities, Visualization techniques and virtual reality«, Torino, January (eingeladener Vortrag)
 Fabio Fontanot: Osservatorio di Padova, 22. Februar (Seminar)
 Anna Gallazzi: University of Oxford, Oxford, 20. November (Kolloquium)
 Dimitrios Gouliermis: Universitätssternwarte München, 2. Juli (Seminar); Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, 23. November (Kolloquium); Argelander-Institut für Astronomie, Bonn, 23. November (Seminar); Department of Astronomy, Astrophysics & Mechanics, University of Athens, 18. Dezember (Vortrag)
 Roland Gredel: Observatoire de Strasbourg, 13. Juli (eingeladener Vortrag); JENAM, Yerevan, 20. – 24. August (zwei eingeladene Vorträge)
 Boris Häußler: Lunch Seminar, University of Nottingham, 17. Mai

Martin Hennemann: Sternwarte Helsinki, 21. November (Astrophysical Colloquium Vortrag);
 Thomas Henning: Joint Astronomy Colloquium Munich, Garching, 25. Januar (eingeladener Vortrag); Astronomisches Kolloquium der Universität Hamburg, 8. Februar (eingeladener Vortrag); Konferenz »From Stars to Planets: Connecting our Understanding of Star and Planet Formation«, Gainesville, 11. – 14. April (eingeladener Vortrag); Konferenz »The 150th Anniversary of Gothard's birth«, Szombathely, 31. Mai – 3. Juni (Festvortrag); Nobel Symposium »Physics of Planetary Systems«, Stockholm, 18. – 2. Juni (eingeladener Vortrag); Meeting »Massive Star Formation: Observations Confront Theory«, Heidelberg, 10. – 14. September (eingeladener Vortrag); 2nd ARENA Conference »The Astrophysical Science Cases at Dome C«, Potsdam, 17. – 21. September (eingeladener Vortrag); KITP, Santa Barbara, 5. – 6. November (Star Formation Through Cosmic Time Program, eingeladener Vortrag); Physikalisches Kolloquium der ETH Zürich, 28. November (eingeladener Vortrag); Symposium at the Occasion of Arne Ardeberg's Retirement, Lund Observatory, 29. November (eingeladener Vortrag)
 Friedrich Huisken: Fachbereich Chemie der Technischen Universität Kaiserslautern, 25. Mai (eingeladener Vortrag)
 Viki Joergens: Konferenz »Extreme Solar Systems«, Santorini, 25. – 29. Juni (eingeladener Vortrag)
 Anders Johansen: Sterrewacht Leiden, Januar (Seminar); Stockholm Observatory, Januar (Seminar); TU Braunschweig, Februar (Seminar); CITA, University of Toronto, April (Seminar); DAMTP, University of Cambridge, Juni (Seminar); Fachbeirat MPIA, Oktober (Vortrag); Laboratoire de Radioastronomie ENS, Paris, November (MHD Lunch Seminar); Copenhagen University, November (Astrophysikalisches Seminar)
 Hubert Klahr: Nobel Symposium 135 »Physics of Planetary Systems«, Stockholm 18. – 22. Juni (eingeladener Vortrag); KITP – Star Formation through Cosmic Time, Santa Barbara, CA, 30. November (eingeladener Vortrag); Universität Bern, 19. Dezember (Kolloquium)
 Dietrich Lemke: Universität Helsinki, Juni (Kolloquium)
 Hendrik Linz: TLS Tautenburg, 17. Oktober (eingeladener Vortrag)

- Nicolas Martin: Institute for Astronomy, University of Hawaii, Honolulu, USA, 6. März (Kolloquium); UCLA, Department of Physics and Astronomy, Los Angeles, 26. März (Kolloquium); MPI für Extraterrestrische Physik, Garching, 5. Juni (Kolloquium)
- Markus Nielbock: Ruhr-Universität Bochum, 11. Dezember, (Kolloquium)
- Anna Pasquali: ASU in Tempe/Arizona (eingeladener Vortrag)
- Paola Re Fiorentin: University of Ljubljana, Dept. Mathematics and Physics, 6. Juni (eingeladener Vortrag)
- Dominik A. Riechers: Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft: »Cosmic Matter«, Würzburg, 24. – 29. September (eingeladener Vortrag); Konferenz »Galaxy and Black Hole Evolution: Towards a Unified View«, Tucson, 28. – 30. November (eingeladener Vortrag)
- Hans-Walter Rix: Konferenz »Dynamics of Galaxies«, St. Petersburg, Russland, 6. – 9. August (eingeladener Vortrag); NIRSPEC IST Meeting, Lyon, Frankreich, 19/20. November (eingeladener Vortrag)
- Florian Rodler: Astronomisches Institut der Universität Wien, 30. Januar (eingeladener Vortrag)
- Marc Schartmann: »The Impact of AGN feedback on Galaxy formation: theoretical modelling and observational signatures«, Schloss Ringberg, 20. – 26. Mai (eingeladener Vortrag)
- Eva Schinnerer: Workshop »The Impact of AGN Feedback on Galaxy Formation«, Schloss Ringberg (eingeladener Vortrag)
- Dmitri A. Semenov: ITA, Heidelberg, 17. Januar (Vortrag); Sterrewacht Leiden, 6. Dezember (Vortrag)
- Kester W. Smith: 10th Italian-Korean meeting on Relativistic Astrophysics, Pescara, 25. – 30. Juni (eingeladener Vortrag)
- Jürgen Steinacker: Konferenz »New Trends in Radiation Hydrodynamics«, Stockholm, 10. Mai (eingeladener Vortrag); Workshop »Tracing Dust in Spiral Galaxies: radiative transfer studies in the dawn of a new generation of observing facilities«, Ghent, 14. Mai (eingeladener Vortrag); ESO workshop on 12 Questions on Star and Massive Star Cluster Formation, Garching, 4. Juli (eingeladener Vortrag); Konferenz »Massive Star Formation: Observations confront Theory«, Heidelberg, 11. September (eingeladener Vortrag); Grand Challenge Problems in Computational Astrophysics, Reunion Konferenz II, Lake Arrowhead, 13. Dezember (eingeladener Vortrag)
- Frank Van den Bosch: Kavli Institute for Cosmological Physics, 7. Februar (Kolloquium); Center for Cosmology and Particle Physics, NYU, New York, 9. Februar (Kolloquium); Chicago Konferenz »Clusters of Galaxies as Cosmological Probes«, Aspen Center for Physics, 12. – 16. Februar (eingeladener Vortrag); Observatoire de Strasbourg, 23. März (Kolloquium); GIF Workshop »Galaxy Formation«, Jerusalem & Haifa, Israel, 12. – 15. April (eingeladener Vortrag); Workshop »Modeling Galaxy Clustering«, Aspen Center for Physics, 11. – 29. Juni (eingeladener Vortrag); Aspen Center for Physics, Colorado, 28. Juni (Kolloquium); Konferenz »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg 16. – 20. Juli (eingeladener Vortrag); Department of Astronomy, University of Massachusetts, Amherst, 2. November (Seminar)
- Fabian Walter: Cambridge Colloquium, Februar (eingeladener Vortrag); NRAO 50th Anniversary, Charlottesville, Juni (eingeladener Vortrag); Konferenz »Galaxies in the Local Universe«, Sydney, Juli (eingeladener Vortrag); Konferenz »Gas Accretion and Star Formation in Galaxies« MPA/ESO, Garching, September (eingeladener Vortrag)
- Sebastian Wolf: Technische Universität Berlin (Kolloquium); Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (ASIAA), Taiwan (Kolloquium); Landessternwarte Heidelberg (Kolloquium); Astronomisches Recheninstitut, Heidelberg (Kolloquium); Universität Heidelberg, Fakultät für Physik und Astronomie (Habilitationsvortrag); Universität Kiel (Kolloquium)

Vortragsreihen

- Hubert Klahr: VLTI Summerschool »On the FRINGE«, Porto, 28. Mai – 8. Juni
- Martin Kürster: »Extrasolar Planets: Observations«, Split International Winter School of Astrophysics (SIWA), Split (Croatia), 19. – 24. Februar
- Sebastian Wolf: Summer School »Circumstellar Disks and Planets« im Rahmen des EU Marie Curie Research Training Network »On the FRINGE«, Porto, Juni (Co-Organization und Unterricht); Seminar-Serie »Extrasolar Planets«, Internationale Akademie VIII der Studienstiftung des Deutschen Volkes, Rot an der Rot, Juli (Co-Organization und Unterricht)

Populärwissenschaftliche Vorträge

- Helmut Dannerbauer: »Sternentstehung im jungen Universum«, Vortragsreihe »Astronomie am Nachmittag«, Mannheimer Planetarium, 20. November
- Cornelis Dullemond: »Geburtsstätten der Planeten: Gas- und Staubscheiben um junge Sterne«, Astronomie am Sonntag Vormittag, MPIA, 10. Juni

- Roland Gredel: »Riesenteleskope – Neue Giganten für den Blick ins All«, *Astronomie am Sonntag Vormittag*, MPIA, 22. Juli
- Maiken Gustaffson: »Formation of Stars and Planets«, *Fysikshow Workshop for High School students*, Aarhus University, Aarhus, Dänemark
- Boris Häußler: »Vom Urknall bis heute«, *Freundeskreis des Planetarium Mannheim*, 22. Mai
- Thomas Henning: »Extrasolare Planetensysteme: Die Entdeckung neuer Welten«, *Astronomie am Sonntag Vormittag*, MPIA, 8. Juli
- Stefan Hippler: »Warum funkeln die Sterne? – Astronomie mit den modernsten Teleskopen der Welt«, Gießen, 17. Februar; Vortrag im Planetarium Mannheim, 23. Februar; Vortrag im Rahmen des Rotarier-Sommertreffens in Mosbach, 6. August; Vortrag an der Robert-Mayer-Volks- und Schulsternwarte Heilbronn, 14. Dezember
- Klaus Jäger: »Galaxien und Terabytes – Optische Astronomie im Zeitalter moderner Großteleskope«, BOGY, MPIA, 12. Februar; »Geheimnisvolle Quasare – einem Rätsel auf der Spur«, Planetarium Mannheim, 17. April; »Virtuelle Planetarien«, Girls' Day, MPIA, 26. April; »Galaxien und Terabytes – Optische Astronomie im Zeitalter moderner Großteleskope«, Starkenburg-Sternwarte Heppenheim, 22. Mai und BOGY, MPIA, 22. Oktober
- Ulrich Klaas: »Kosmische Katastrophen und Sternentstehung«, *Astronomie am Nachmittag*, Planetarium Mannheim, 18. September
- Hubert Klahr: »Magnetische Stürme und Planeten auf der Wanderschaft«, *Astronomie am Sonntag Vormittag*, MPIA, 17. Juni
- Oliver Krause: »Das James Webb Weltraumteleskop – ein neues Fenster zum Kosmos«, Planetarium Mannheim, 5. Oktober; »Das James Webb Weltraumteleskop – ein neues Fenster zum Kosmos«, FH Rüsselsheim, 16. November
- Christoph Leinert: »Warum ist der Himmel nachts dunkel – das Olbers'sche Paradox«, Planetarium Mannheim, 16. Oktober
- Dietrich Lemke: »Der große Orion-Nebel«, Planetarium Wolfsburg, 15. Februar; »Zurück zum Mond«, *Astronomie am Sonntagvormittag*, MPIA, 1. Juli sowie Rotary Club Schwetzingen/Walldorf, 8. November und Sternfreunde Nordenham, 13. November
- Hendrik Linz: »Blick ins All bei langen Wellen: Vergangenheit und Zukunft der Radioastronomie«, *Astronomie am Sonntag Vormittag*, MPIA, 15. Juli
- Nadine Neumayer: »Schwerkraftmonster in Galaktischen Zentren: Wie wiegt man Schwarze Löcher?«, *Astronomie am Sonntag Vormittag*, MPIA, 24. Juni
- Sascha P. Quanz: »Auf der Suche nach der zweiten Erde – Planeten und Ihre Entstehung«, Jahresvortrag der Astronomischen Vereinigung Weikersheim e.V., Bad Mergentheim, November
- Hans-Walter Rix: »Andere Welten, andere Universen? Die Grenzen kosmologischer Schlussfolgerungen«, Vortragsreihe »Zukunftsfragen der Gesellschaft«, Mainzer Akademie der Wissenschaften und der Literatur, Mainz, 23. Februar; »Das neue Bild der Milchstraße«, VHS Rüsselsheim, 18. Mai; »Wie es Licht wurde im Universum«, Konferenz »Galaxy Growth in a Dark Universe«, Heidelberg, 16. – 20. Juli
- Hermann-Josef Röser: »Suche nach entfernten Galaxienhaufen«, *Volkssternwarte Darmstadt*, 29. September
- Florian Rodler: »Das 70-cm-King-Teleskop des MPIA«, *Nacht der Wissenschaft*, MPIA, 10. November
- Jutta Stegmaier: »Sterne, die vom Himmel fallen – die Leoniden kommen!«, *Nacht der Wissenschaft*, MPIA, 10. November
- Jürgen Steinacker: »Das ungelöste Rätsel der Stern Giganten«, *Nacht der Wissenschaft*, MPIA, 10. November
- Sebastian Wolf: »Planeten unserer Sonne und anderer Sterne«, *Nacht der Wissenschaft*, MPIA, 10. November

Veröffentlichungen

In Zeitschriften mit Referierungssystem

- Adelman-McCarthy, J. K., M. A. Agüeros, S. S. Allam, K. S. J. Anderson, S. F. Anderson, J. Annis, N. A. Bahcall, C. A. L. Bailer-Jones, I. K. Baldry, J. C. Barentine, T. C. Beers, V. Belokurov, A. Berlind, M. Bernardi, M. R. Blanton, J. J. Bochanski, W. N. Boroski, D. M. Bramich, H. J. Brewington, J. Brinchmann, J. Brinkmann, R. J. Brunner, T. Budavári, L. N. Carey, S. Carliles, M. A. Carr, F. J. Castander, A. J. Connolly, R. J. Cool, C. E. Cunha, I. Csabai, J. J. Dalcanton, M. Doi, D. J. Eisenstein, M. L. Evans, N. W. Evans, X. Fan, D. P. Finkbeiner, S. D. Friedman, J. A. Frieman, M. Fukugita, B. Gillespie, G. Gilmore, K. Glazebrook, J. Gray, E. K. Grebel, J. E. Gunn, E. de Haas, P. B. Hall, M. Harvanek, S. L. Hawley, J. Hayes, T. M. Heckman, J. S. Hendry, G. S. Hennessy, R. B. Hindsley, C. M. Hirata, C. J. Hogan, D. W. Hogg, J. A. Holtzman, S.-i. Ichikawa, T. Ichikawa, Z. Ivezić, S. Jester, D. E. Johnston, A. M. Jorgensen, M. Juric, G. Kauffmann, S. M. Kent, S. J. Kleinman, G. R. Knapp, A. Y. Kniazev, R. G. Kron, J. Krzesinski, N. Kuropatkin, D. Q. Lamb, H. Lampeitl, B. C. Lee, R. F. Leger, M.

- Lima, H. Lin, D. C. Long, J. Loveday, R. H. Lupton, R. Mandelbaum, B. Margon, D. Martínez-Delgado, T. Matsubara, P. M. McGehee, T. A. McKay, A. Meiksin, J. A. Munn, R. Nakajima, T. Nash, E. H. Neilsen, Jr., H. J. Newberg, R. C. Nichol, M. Nieto-Santisteban, A. Nitta, H. Oyaizu, S. Okamura, J. P. Ostriker, N. Padmanabhan, C. Park, J. Peoples, Jr., J. R. Pier, A. C. Pope, D. Pourbaix, T. R. Quinn, M. J. Raddick, P. Re Fiorentin, G. T. Richards, M. W. Richmond, H.-W. Rix, C. M. Rockosi, D. J. Schlegel, D. P. Schneider, R. Scranton, U. Seljak, E. Sheldon, K. Shimasaku, N. M. Silvestri, J. A. Smith, V. Smolcic, S. A. Snedden, A. Stebbins, C. Stoughton, M. A. Strauss, M. SubbaRao, Y. Suto, A. S. Szalay, I. Szapudi, P. Szkody, M. Tegmark, A. R. Thakar, C. A. Tremonti, D. L. Tucker, A. Uomoto, D. E. Vanden Berk, J. Vandenberg, S. Vidrih, M. S. Vogeley, W. Voges, N. P. Vogt, D. H. Weinberg, A. A. West, S. D. M. White, B. Wilhite, B. Yanny, D. R. Yocum, D. G. York, I. Zehavi, S. Zibetti, D. B. Zucker: The Fifth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 634-644 (2007)
- Apai, D., A. Bik, L. Kaper, T. Henning, H. Zinnecker: Massive binaries in high-mass star-forming regions: a multipole radial velocity survey of embedded O stars. *The Astrophysical Journal* 655, 484-491 (2007)
- Araya, E., P. Hofner, W. M. Goss, H. Linz, S. Kurtz, L. Olmi: A search for formaldehyde 6 cm emission toward young stellar objects. II. H₂CO and H110a observations. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 170, 152-174 (2007)
- Araya, E., P. Hofner, M. Sewilo, W. M. Goss, H. Linz, S. Kurtz, L. Olmi, E. Churchwell, L. F. Rodríguez, G. Garay: An H₂CO 6 cm maser pinpointing a possible circumstellar torus in IRAS 18566 + 0408. *The Astrophysical Journal* 669, 1050-1057 (2007)
- Araya, E., P. Hofner, M. Sewilo, H. Linz, S. Kurtz, L. Olmi, C. Watson, E. Churchwell: First detection of an H₂CO 6 cm maser flare: a burst in IRAS 18566 + 0408. *The Astrophysical Journal* 654, L95-L98 (2007)
- Banerjee, R., R. S. Klessen, C. Fendt: Can protostellar jets drive supersonic turbulence in molecular clouds? *The Astrophysical Journal* 668, 1028-1041 (2007)
- Beers, T. C., C. Flynn, S. Rossi, J. Sommer-Larsen, R. Wilhelm, B. Marsteller, Y. S. Lee, N. De Lee, J. Krugler, C. P. Deliyannis, A. T. Simmons, E. Mills, F.-J. Zickgraf, J. Holmberg, A. Önehag, A. Eriksson, D. M. Terndrup, S. Salim, J. Andersen, B. Nordström, N. Christlieb, A. Frebel, J. Rhee: Broadband UBVR_CI_C photometry of horizontal-branch and metal-poor candidates from the HK and Hamburg/ESO surveys. I. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 168, 128-139 (2007)
- Bell, E. F., X. Z. Zheng, C. Papovich, A. Borch, C. Wolf, K. Meisenheimer: Star formation and the growth of stellar mass. *The Astrophysical Journal* 663, 834-843 (2007)
- Belokurov, V., N. W. Evans, E. F. Bell, M. J. Irwin, P. C. Hewett, S. Kaposov, C. M. Rockosi, G. Gilmore, D. B. Zucker, M. Fellhauer, M. I. Wilkinson, D. M. Bramich, S. Vidrih, H. W. Rix, T. C. Beers, D. P. Schneider, J. C. Barentine, H. Brewington, J. Brinkmann, M. Harvanek, J. Krzesinski, D. Long, K. Pan, S. A. Snedden, O. Malanushenko, V. Malanushenko: The Hercules-Aquila cloud. *The Astrophysical Journal* 657, L89-L92 (2007)
- Belokurov, V., N. W. Evans, M. J. Irwin, D. Lynden-Bell, B. Yanny, S. Vidrih, G. Gilmore, G. Seabroke, D. B. Zucker, M. I. Wilkinson, P. C. Hewett, D. M. Bramich, M. Fellhauer, H. J. Newberg, R. F. G. Wyse, T. C. Beers, E. F. Bell, J. C. Barentine, J. Brinkmann, N. Cole, K. Pan, D. G. York: An Orphan in the »Field of Streams«. *The Astrophysical Journal* 658, 337-344 (2007)
- Belokurov, V., D. B. Zucker, N. W. Evans, J. T. Kleyna, S. Kaposov, S. T. Hodgkin, M. J. Irwin, G. Gilmore, M. I. Wilkinson, M. Fellhauer, D. M. Bramich, P. C. Hewett, S. Vidrih, J. T. A. De Jong, J. A. Smith, H. W. Rix, E. F. Bell, R. F. G. Wyse, H. J. Newberg, P. A. Mayeur, B. Yanny, C. M. Rockosi, O. Y. Gnedin, D. P. Schneider, T. C. Beers, J. C. Barentine, H. Brewington, J. Brinkmann, M. Harvanek, S. J. Kleinman, J. Krzesinski, D. Long, A. Nitta, S. A. Snedden: Cats and dogs, hair and a hero: a quintet of New Milky Way companions. *The Astrophysical Journal* 654, 897-906 (2007)
- Bendo, G. J., D. Calzetti, C. W. Engelbracht, R. C. Kennicutt, M. J. Meyer, M. D. Thornley, F. Walter, D. A. Dale, A. Li, E. J. Murphy: Variations in 24 μm morphologies among galaxies in the SPITZER Infrared Nearby Galaxies Survey: new insights into the HUBBLE sequence. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 380, 1313-1334 (2007)
- Bertoldi, F., C. Carilli, M. Aravena, E. Schinnerer, H. Voss, V. Smolcic, K. Jahnke, N. Scoville, A. Blain, K. M. Menten, D. Lutz, M. Brusa, Y. Taniguchi, P. Capak, B. Mobasher, S. Lilly, D. Thompson, H. Aussel, E. Kreysa, G. Hasinger, J. Aguirre, J. Schlaerth, A. Koekemoer: COSBO: the MAMBO 1.2 millimeter imaging survey of the COSMOS field. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 132-149 (2007)
- Beuther, H., S. Leurini, P. Schilke, F. Wyrowski, K. M. Menten, Q. Zhang: Interferometric multi-wavelength (sub)millimeter continuum study of the young high-mass protocluster IRAS 05358 + 3543. *Astronomy and Astrophysics* 466, 1065-1076 (2007)
- Beuther, H., T. K. Sridharan: Outflow and dense gas emission from massive infrared dark clouds. *The Astrophysical Journal* 668, 348-358 (2007)
- Beuther, H., J. Steinacker: The protostar in the massive infrared dark cloud IRDC 18223-3. *The Astrophysical Journal* 656, L85-L88 (2007)
- Beuther, H., A. J. Walsh, S. Thorwirth, Q. Zhang, T. R. Hunter, S. T. Megeath, K. M. Menten: Hot ammonia in NGC 6334I & I(N). *Astronomy and Astrophysics* 466, 989-998 (2007)
- Beuther, H., Q. Zhang, E. A. Bergin, T. K. Sridharan, T. R. Hunter, S. Leurini: Dust and gas emission in the prototypical hot core G29.96-0.02 at sub-arcsecond resolution. *Astronomy and Astrophysics* 468, 1045-1056 (2007)

- Beuther, H., Q. Zhang, T. R. Hunter, T. K. Sridharan, E. A. Bergin: The $10^5 L_{\odot}$ high-mass protostellar object IRAS 23151 + 5912. *Astronomy and Astrophysics* 473, 493-500 (2007)
- Biazzo, K., L. Pasquini, L. Girardi, A. Frasca, L. da Silva, J. Setiawan, E. Marilli, A. P. Hatzes, S. Catalano: Deriving temperature, mass, and age of evolved stars from high-resolution spectra. Application to field stars and the open cluster IC 4651. *Astronomy and Astrophysics* 475, 981-989 (2007)
- Biller, B. A., L. M. Close, E. Masciadri, E. Nielsen, R. Lenzen, W. Brandner, D. McCarthy, M. Hartung, S. Kellner, E. Mamajek, T. Henning, D. Miller, M. Kenworthy, C. Kulesa: An imaging survey for extrasolar planets around 45 close, young stars with the simultaneous differential imager at the Very Large Telescope and MMT. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 173, 143-165 (2007)
- Birkmann, S. M., O. Krause, M. Hennemann, T. Henning, J. Steinacker, D. Lemke: A massive protostellar core with an infalling envelope. *Astronomy and Astrophysics* 474, 883-890 (2007)
- Boone, F., A. J. Baker, E. Schinnerer, F. Combes, S. García-Burillo, R. Neri, L. K. Hunt, S. Léon, M. Krips, L. J. Tacconi, A. Eckart: Molecular gas in NUClei of GALaxies (NUGA). VII. NGC 4569, a large scale bar funnelling gas into the nuclear region. *Astronomy and Astrophysics* 471, 113-125 (2007)
- Bournaud, F., P.-A. Duc, E. Brinks, M. Boquien, P. Amram, U. Lisenfeld, B. S. Koribalski, F. Walter, V. Charmandaris: Missing mass in collisional debris from galaxies. *Science* 316, 1166-1169 (2007)
- Brauer, F., C. P. Dullemond, A. Johansen, T. Henning, H. Klahr, A. Natta: Survival of the mm-cm size grain population observed in protoplanetary disks. *Astronomy and Astrophysics* 469, 1169-1182 (2007)
- Brown, J. M., G. A. Blake, C. P. Dullemond, B. Merín, J. C. Augereau, A. C. A. Boogert, N. J. Evans, II, V. C. Geers, F. Lahuis, J. E. Kessler-Silacci, K. M. Pontoppidan, E. F. van Dishoeck: Cold disks: SPITZER Spectroscopy of disks around young stars with large gaps. *The Astrophysical Journal* 664, L107-L110 (2007)
- Butler, D. J., D. Martínez-Delgado, H. W. Rix, J. Peñarrubia, J. T. A. de Jong: A Canis Major Overdensity Imaging Survey. I. Stellar content and star-count maps: a distinctly elongated body of main-sequence stars. *The Astronomical Journal* 133, 2274-2290 (2007)
- Caballero, J. A.: Southern wide very low-mass stars and brown dwarfs in resolved binary and multiple systems. *The Astrophysical Journal* 667, 520-526 (2007)
- Caballero, J. A.: A near-infrared/optical/X-ray survey in the centre of σ Orionis. *Astronomische Nachrichten* 328, 917-927 (2007)
- Caballero, J. A.: The brightest stars of the σ Orionis cluster. *Astronomy and Astrophysics* 466, 917-930 (2007)
- Caballero, J. A.: The widest ultracool binary. *Astronomy and Astrophysics* 462, L61-L64 (2007)
- Caballero, J. A., V. J. S. Béjar, R. Rebolo, J. Eisloffel, M. R. Zapatero Osorio, R. Mundt, D. Barrado Y Navascués, G. Bihain, C. A. L. Bailer-Jones, T. Forveille, E. L. Martín: The substellar mass function in σ Orionis. II. Optical, near-infrared and IRAC/SPITZER photometry of young cluster brown dwarfs and planetary-mass objects. *Astronomy and Astrophysics* 470, 903-918 (2007)
- Caballero, J. A., E. Solano: Albus 1: a very bright white dwarf candidate. *The Astrophysical Journal* 665, L151-L154 (2007)
- Calzetti, D., R. C. Kennicutt, C. W. Engelbracht, C. Leitherer, B. T. Draine, L. Kewley, J. Moustakas, M. Sosey, D. A. Dale, K. D. Gordon, G. X. Helou, D. J. Hollenbach, L. Armus, G. Bendo, C. Bot, B. Buckalew, T. Jarrett, A. Li, M. Meyer, E. J. Murphy, M. Prescott, M. W. Regan, G. H. Rieke, H. Roussel, K. Sheth, J. D. T. Smith, M. D. Thornley, F. Walter: The calibration of mid-infrared star formation rate indicators. *The Astrophysical Journal* 666, 870-895 (2007)
- Capak, P., H. Aussel, M. Ajiki, H. J. McCracken, B. Mobasher, N. Scoville, P. Shopbell, Y. Taniguchi, D. Thompson, S. Tribiano, S. Sasaki, A. W. Blain, M. Brusa, C. Carilli, A. Comastri, C. M. Carollo, P. Cassata, J. Colbert, R. S. Ellis, M. Elvis, M. Giavalisco, W. Green, L. Guzzo, G. Hasinger, O. Ilbert, C. Impey, K. Jahnke, J. Kartaltepe, J. P. Kneib, J. Koda, A. Koekemoer, Y. Komiyama, A. Leauthaud, O. Lefevre, S. Lilly, C. Liu, R. Massey, S. Miyazaki, T. Murayama, T. Nagao, J. A. Peacock, A. Pickles, C. Porciani, A. Renzini, J. Rhodes, M. Rich, M. Salvato, D. B. Sanders, C. Scarlata, D. Schiminovich, E. Schinnerer, M. Scodreggio, K. Sheth, Y. Shioya, L. A. M. Tasca, J. E. Taylor, L. Yan, G. Zamorani: The first release COSMOS optical and Near-IR data and catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 99-116 (2007)
- Carilli, C. L., T. Murayama, R. Wang, E. Schinnerer, Y. Taniguchi, V. Smolcic, F. Bertoldi, M. Ajiki, T. Nagao, S. S. Sasaki, Y. Shioya, J. E. Aguirre, A. W. Blain, N. Scoville, D. B. Sanders: Radio and millimeter properties of $z \sim 5.7$ Ly α emitters in the COSMOS field: limits on radio AGNs, submillimeter galaxies, and dust obscuration. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 518-522 (2007)
- Carilli, C. L., R. Neri, R. Wang, P. Cox, F. Bertoldi, F. Walter, X. Fan, K. Menten, J. Wagg, R. Maiolino, A. Omont, M. A. Strauss, D. Riechers, K. Y. Lo, A. Bolatto, N. Scoville: Detection of $1.6 \times 10^{10} M_{\odot}$ of molecular gas in the host galaxy of the $z = 5.77$ SDSS quasar J0927 + 2001. *The Astrophysical Journal* 666, L9-L12 (2007)
- Carlson, L. R., E. Sabbi, M. Sirianni, J. L. Hora, A. Nota, M. Meixner, J. S. Gallagher, III, M. S. Oey, A. Pasquali, L. J. Smith, M. Tosi, R. Walterbos: Progressive star formation in the young SMC cluster NGC 602. *The Astrophysical Journal* 665, L109-L114 (2007)
- Carmona, A., M. E. van den Ancker, T. Henning: Optical spectroscopy of close companions to nearby Herbig Ae/Be and T Tauri stars. *Astronomy and Astrophysics* 464, 687-695 (2007)

- Carmona, A., M. E. van den Ancker, T. Henning, M. Goto, D. Fedele, B. Stecklum: A search for near-infrared molecular hydrogen emission in the CTTS LkHa 264 and the debris disk 49 Ceti. *Astronomy and Astrophysics* 476, 853-862 (2007)
- Carollo, D., T. C. Beers, Y. S. Lee, M. Chiba, J. E. Norris, R. Wilhelm, T. Sivarani, B. Marsteller, J. A. Munn, C. A. L. Bailer-Jones, P. R. Fiorentin, D. G. York: Two stellar components in the halo of the Milky Way. *Nature* 450, 1020-1025 (2007)
- Chapman, S. C., J. Peñarrubia, R. Ibata, A. McConnachie, N. Martin, M. Irwin, A. Blain, G. F. Lewis, B. Letarte, K. Lo, A. Ludlow, K. O'Neil: Strangers in the night: discovery of a dwarf spheroidal galaxy on its first Local Group infall. *The Astrophysical Journal* 662, L79-L82 (2007)
- Chen, X., R. Launhardt, T. Henning: OVRO N_2H^+ observations of class 0 protostars: constraints on the formation of binary stars. *The Astrophysical Journal* 669, 1058-1071 (2007)
- Chen, X. P., R. Launhardt, T. Henning: VLT/NACO adaptive optics imaging of GSS 30 IRS1: a protostellar binary system? *Astronomy and Astrophysics* 475, 277-280 (2007)
- Chesneau, O., F. Lykou, B. Balick, E. Lagadec, M. Matsuura, N. Smith, A. Spang, S. Wolf, A. A. Zijlstra: A silicate disk in the heart of the Ant. *Astronomy and Astrophysics* 473, L29-L32 (2007)
- Christensen, L., L. Wisotzki, M. M. Roth, S. F. Sánchez, A. Kelz, K. Jahnke: An integral field spectroscopic survey for high redshift damped Lyman- α galaxies. *Astronomy and Astrophysics* 468, 587-601 (2007)
- Coleman, M. G., J. T. A. de Jong, N. F. Martin, H.-W. Rix, D. J. Sand, E. F. Bell, R. W. Pogge, D. J. Thompson, H. Hippelein, E. Giallongo, R. Ragazzoni, A. DiPaola, J. Farinato, R. Smareglia, V. Testa, J. Bechtold, J. M. Hill, P. M. Garnavich, R. F. Green: The elongated structure of the Hercules Dwarf Spheroidal Galaxy from deep Large Binocular Telescope imaging. *The Astrophysical Journal* 668, L43-L46 (2007)
- Coleman, M. G., K. Jordi, H.-W. Rix, E. K. Grebel, A. Koch: A wide-field view of Leo II: a structural analysis using the Sloan Digital Sky Survey. *The Astronomical Journal* 134, 1938-1951 (2007)
- Comerón, F., A. Pasquali: A very massive runaway star from Cygnus OB2. *Astronomy and Astrophysics* 467, L23-L27 (2007)
- Courteau, S., A. A. Dutton, F. C. van den Bosch, L. A. MacArthur, A. Dekel, D. H. McIntosh, D. A. Dale: Scaling relations of spiral galaxies. *The Astrophysical Journal* 671, 203-225 (2007)
- Daddi, E., D. M. Alexander, M. Dickinson, R. Gilli, A. Renzini, D. Elbaz, A. Cimatti, R. Chary, D. Frayer, F. E. Bauer, W. N. Brandt, M. Giavalisco, N. A. Grogin, M. Huynh, J. Kurk, M. Mignoli, G. Morrison, A. Pope, S. Ravindranath: Multiwavelength study of massive galaxies at $z \sim 2$. II. Widespread compton-thick active galactic nuclei and the concurrent growth of black holes and bulges. *The Astrophysical Journal* 670, 173-189 (2007)
- Daddi, E., M. Dickinson, G. Morrison, R. Chary, A. Cimatti, D. Elbaz, D. Frayer, A. Renzini, A. Pope, D. M. Alexander, F. E. Bauer, M. Giavalisco, M. Huynh, J. Kurk, M. Mignoli: Multiwavelength study of massive galaxies at $z \sim 2$. I. Star formation and galaxy growth. *The Astrophysical Journal* 670, 156-172 (2007)
- Dale, D. A., A. Gil de Paz, K. D. Gordon, H. M. Hanson, L. Armus, G. J. Bendo, L. Bianchi, M. Block, S. Boissier, A. Boselli, B. A. Buckalew, V. Buat, D. Burgarella, D. Calzetti, J. M. Cannon, C. W. Engelbracht, G. Helou, D. J. Hollenbach, T. H. Jarrett, R. C. Kennicutt, C. Leitherer, A. Li, B. F. Madore, D. C. Martin, M. J. Meyer, E. J. Murphy, M. W. Regan, H. Roussel, J. D. T. Smith, M. L. Sosey, D. A. Thilker, F. Walter: An ultraviolet-to-radio broadband spectral atlas of nearby galaxies. *The Astrophysical Journal* 655, 863-884 (2007)
- Dannerbauer, H., F. Walter: The Search for the very high-redshift tail of submillimeter galaxies. *Astronomische Nachrichten* 328, 644 (2007)
- de Jong, J. T. A., D. J. Butler, H. W. Rix, A. E. Dolphin, D. Martínez-Delgado: Modeling the stellar populations in the Canis Major overdensity: the relation between the old and young populations. *The Astrophysical Journal* 662, 259-271 (2007)
- de Jong, R. S., A. C. Seth, D. J. Radrurn-Smith, E. F. Bell, T. M. Brown, J. S. Bullock, S. Courteau, J. J. Dalcanton, H. C. Ferguson, P. Goudfrooij, S. Holfeltz, B. W. Holwerda, C. Purcell, J. Sick, D. B. Zucker: Stellar populations across the NGC 4244 truncated galactic disk. *The Astrophysical Journal* 667, L49-L52 (2007)
- Doucet, C., E. Habart, E. Pantin, C. Dullemond, P. O. Lagage, C. Pinte, G. Duchêne, F. Ménard: HD 97048: a closer look at the disk. *Astronomy and Astrophysics* 470, 625-631 (2007)
- Draine, B. T., D. A. Dale, G. Bendo, K. D. Gordon, J. D. T. Smith, L. Armus, C. W. Engelbracht, G. Helou, R. C. Kennicutt, A. Li, H. Roussel, F. Walter, D. Calzetti, J. Moustakas, E. J. Murphy, G. H. Rieke, C. Bot, D. J. Hollenbach, K. Sheth, H. I. Teplitz: Dust masses, PAH abundances, and starlight intensities in the SINGS galaxy sample. *The Astrophysical Journal* 663, 866-894 (2007)
- Dullemond, C. P., T. Henning, R. Visser, V. C. Geers, E. F. van Dishoeck, K. M. Pontoppidan: Dust sedimentation in protoplanetary disks with polycyclic aromatic hydrocarbons. *Astronomy and Astrophysics* 473, 457-466 (2007)
- Dutrey, A., T. Henning, S. Guilloteau, D. Semenov, V. Piétu, K. Schreyer, A. Bacmann, R. Launhardt, J. Pety, F. Gueth: Chemistry in disks. I. Deep search for N_2H^+ in the protoplanetary disks around LkCa 15, MWC 480, and DM Tauri. *Astronomy and Astrophysics* 464, 615-623 (2007)
- Dutton, A. A., F. C. van den Bosch, A. Dekel, S. Courteau: A revised model for the formation of disk galaxies: low spin and dark halo expansion. *The Astrophysical Journal* 654, 27-52 (2007)
- Egner, S. E., W. Gaessler, T. M. Herbst, R. Ragazzoni: A closed loop layer-oriented adaptive optics test bed: appli-

- cations to ground-layer adaptive optics. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 119, 1114-1125 (2007)
- Egner, S. E., E. Masciadri, D. McKenna: Generalized SCIDAR measurements at Mount Graham. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 119, 669-686 (2007)
- Ernst, A., P. Glaschke, J. Fiestas, A. Just, R. Spurzem: *N*-body models of rotating globular clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 377, 465-479 (2007)
- Faber, S. M., C. N. A. Willmer, C. Wolf, D. C. Koo, B. J. Weiner, J. A. Newman, M. Im, A. L. Coil, C. Conroy, M. C. Cooper, M. Davis, D. P. Finkbeiner, B. F. Gerke, K. Gebhardt, E. J. Groth, P. Guhathakurta, J. Harker, N. Kaiser, S. Kassin, M. Kleinheinrich, N. P. Konidakis, R. G. Kron, L. Lin, G. Luppino, D. S. Madgwick, K. Meisenheimer, K. G. Noeske, A. C. Phillips, V. L. Sarajedini, R. P. Schiavon, L. Simard, A. S. Szalay, N. P. Vogt, R. Yan: Galaxy luminosity functions to $z \sim 1$ from DEEP2 and COMBO-17: implications for red galaxy formation. *The Astrophysical Journal* 665, 265-294 (2007)
- Faltenbacher, A., C. Li, S. Mao, F. C. van den Bosch, X. Yang, Y. P. Jing, A. Pasquali, H. J. Mo: Three different types of galaxy alignment within dark matter halos. *The Astrophysical Journal* 662, L71-L74 (2007)
- Finoguenov, A., L. Guzzo, G. Hasinger, N. Z. Scoville, H. Aussel, H. Böhringer, M. Brusa, P. Capak, N. Cappelluti, A. Comastri, S. Giodini, R. E. Griffiths, C. Impey, A. M. Koekemoer, J. P. Kneib, A. Leauthaud, O. Le Fèvre, S. Lilly, V. Mainieri, R. Massey, H. J. McCracken, B. Mobasher, T. Murayama, J. A. Peacock, I. Sakelliou, E. Schinnerer, J. D. Silverman, V. Smolcic, Y. Taniguchi, L. Tasca, J. E. Taylor, J. R. Trump, G. Zamorani: The XMM-Newton Wide-Field Survey in the COSMOS field: statistical properties of clusters of galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 182-195 (2007)
- Fontanot, F., S. Cristiani, P. Monaco, M. Nonino, E. Vanzella, W. N. Brandt, A. Grazian, J. Mao: The luminosity function of high-redshift quasi-stellar objects. A combined analysis of GOODS and SDSS. *Astronomy and Astrophysics* 461, 39-48 (2007)
- Fontanot, F., P. Monaco, L. Silva, A. Grazian: Reproducing the assembly of massive galaxies within the hierarchical cosmogony. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 382, 903-914 (2007)
- Geers, V. C., K. M. Pontoppidan, E. F. van Dishoeck, C. P. Dullemond, J. C. Augereau, B. Merín, I. Oliveira, J. W. Pel: Spatial separation of small and large grains in the transitional disk around the young star IRS 48. *Astronomy and Astrophysics* 469, L35-L38 (2007)
- Geißler, K., S. Kellner, W. Brandner, E. Masciadri, M. Hartung, T. Henning, R. Lenzen, L. Close, M. Endl, M. Kürster: A direct and differential imaging search for sub-stellar companions to ϵ Indi A. *Astronomy and Astrophysics* 461, 665-668 (2007)
- Gilmour, R., M. E. Gray, O. Almaini, P. Best, C. Wolf, K. Meisenheimer, C. Papovich, E. Bell: Environmental dependence of active galactic nuclei activity in the supercluster A901/2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 380, 1467-1487 (2007)
- Gnedin, O. Y., D. H. Weinberg, J. Pizagno, F. Prada, H.-W. Rix: Dark matter halos of disk galaxies: constraints from the Tully-Fisher relation. *The Astrophysical Journal* 671, 1115-1134 (2007)
- Goto, M., S. Kwok, H. Takami, M. Hayashi, W. Gaessler, Y. Hayano, M. Iye, Y. Kamata, T. Kanzawa, N. Kobayashi, Y. Minowa, K. Nedachi, S. Oya, T. S. Pyo, D. Saint-Jacques, N. Takato, H. Terada, T. Henning: Diffraction-limited 3 μ m spectroscopy of IRAS 04296+3429 and IRAS 05341+0852: spatial extent of hydrocarbon dust emission and dust evolutionary sequence. *The Astrophysical Journal* 662, 389-394 (2007)
- Gouliermis, D. A., T. Henning, W. Brandner, A. E. Dolphin, M. Rosa, B. Brandl: Discovery of the pre-main-sequence population of the stellar association LH 95 in the Large Magellanic Cloud with HUBBLE Space Telescope advanced camera for surveys observations. *The Astrophysical Journal* 665, L27-L30 (2007)
- Gouliermis, D. A., S. P. Quanz, T. Henning: Clustered star formation in the Small Magellanic Cloud. A SPITZER/IRAC view of the star-forming region NGC 602/N 90. *The Astrophysical Journal* (2007)
- Grady, C. A., G. Schneider, K. Hamaguchi, M. L. Sitko, W. J. Carpenter, D. Hines, K. A. Collins, G. M. Williger, B. E. Woodgate, T. Henning, F. Ménard, D. Wilner, R. Petre, P. Palunas, A. Quirrenbach, J. A. Nuth, III, M. D. Silverstone, J. S. Kim: The disk and environment of a young Vega analog: HD 169142. *The Astrophysical Journal* 665, 1391-1406 (2007)
- Gredel, R.: Quantitative optical and near-infrared spectroscopy of H₂ towards HH91A. *Astronomy and Astrophysics* 474, 941-950 (2007)
- Güdel, M., A. Telleschi: The X-ray soft excess in classical T Tauri stars. *Astronomy and Astrophysics* 474, L25-L28 (2007)
- Guenther, E. W., M. Esposito, R. Mundt, E. Covino, J. M. Alcalá, F. Cusano, B. Stecklum: Pre-main sequence spectroscopic binaries suitable for VLTI observations. *Astronomy and Astrophysics* 467, 1147-1155 (2007)
- Häußler, B., D. H. McIntosh, M. Barden, E. F. Bell, H.-W. Rix, A. Borch, S. V. W. Beckwith, J. A. R. Caldwell, C. Heymans, K. Jahnke, S. Jogee, S. E. Koposov, K. Meisenheimer, S. F. Sánchez, R. S. Somerville, L. Wisotzki, C. Wolf: GEMS: galaxy fitting catalogs and testing parametric galaxy fitting codes: GALFIT and GIM2D. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 615-633 (2007)
- Herbst, T. M., M. Hartung, M. E. Kasper, C. Leinert, T. Ratzka: Molecular hydrogen outflows in the central arcseconds of the T Tauri system. *The Astronomical Journal* 134, 359-366 (2007)
- Hines, D. C., G. Schneider, D. Hollenbach, E. E. Mamajek, L. A. Hillenbrand, S. A. Metchev, M. R. Meyer, J. M. Carpenter, A. Moro-Martín, M. D. Silverstone, J. S. Kim, T. Henning, J. Bouwman, S. Wolf: The moth: an unusual

- circumstellar structure associated with HD 61005. *The Astrophysical Journal* 671, L165-L168 (2007)
- Hormuth, F., W. Brandner, S. Hippler, M. Janson, T. Henning: Direct imaging of the young spectroscopic binary HD 160934. *Astronomy and Astrophysics* 463, 707-711 (2007)
- Ibata, R., N. F. Martin, M. Irwin, S. Chapman, A. M. N. Ferguson, G. F. Lewis, A. W. McConnachie: The haunted halos of Andromeda and Triangulum: a panorama of galaxy formation in action. *The Astrophysical Journal* 671, 1591-1623 (2007)
- Irwin, M. J., V. Belokurov, N. W. Evans, E. V. Ryan-Weber, J. T. A. de Jong, S. Koposov, D. B. Zucker, S. T. Hodgkin, G. Gilmore, P. Prema, L. Hebb, A. Begum, M. Fellhauer, P. C. Hewett, R. C. Kennicutt, Jr., M. I. Wilkinson, D. M. Bramich, S. Vidrih, H. W. Rix, T. C. Beers, J. C. Barentine, H. Brewington, M. Harvanek, J. Krzesinski, D. Long, A. Nitta, S. A. Snedden: Discovery of an unusual dwarf galaxy in the outskirts of the Milky Way. *The Astrophysical Journal* 656, L13-L16 (2007)
- Ivezic, Z., J. Allyn Smith, G. Miknaitis, H. Lin, D. Tucker, R. H. Lupton, J. E. Gunn, G. R. Knapp, M. A. Strauss, B. Sesar, M. Doi, M. Tanaka, M. Fukugita, J. Holtzman, S. Kent, B. Yanny, D. Schlegel, D. Finkbeiner, N. Padmanabhan, C. M. Rockosi, M. Juric, N. Bond, B. Lee, C. Stoughton, S. Jester, H. Harris, P. Harding, H. Morrison, J. Brinkmann, D. P. Schneider, D. York: Sloan Digital Sky Survey Standard Star Catalog for stripe 82: the dawn of industrial 1% optical photometry. *The Astronomical Journal* 134, 973-998 (2007)
- Jäger, C., F. Huisken, H. Mutschke, T. Henning, W. Poppitz, I. Voicu: Identification and spectral properties of PAHs in carbonaceous material produced by laser pyrolysis. *Carbon* 45, 2981-2994 (2007)
- Jahnke, K., L. Wisotzki, F. Courbin, G. Letawe: Spatial decomposition of on-nucleus spectra of quasar host galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 378, 23-40 (2007)
- Janson, M.: Celestial exoplanet survey occulter: A concept for direct imaging of extrasolar Earth-like planets from the ground. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 119, 214-227 (2007)
- Janson, M., W. Brandner, T. Henning, R. Lenzen, B. McArthur, G. F. Benedict, S. Reffert, E. Nielsen, L. Close, B. Biller, S. Kellner, E. Günther, A. Hatzes, E. Masciadri, K. Geissler, M. Hartung: NACO-SDI direct imaging search for the exoplanet e Eri b. *The Astronomical Journal* 133, 2442-2456 (2007)
- Janson, M., W. Brandner, R. Lenzen, L. Close, E. Nielsen, M. Hartung, T. Henning, H. Bouy: Improved age constraints for the AB Doradus quadruple system. The binary nature of AB Doradus B. *Astronomy and Astrophysics* 462, 615-620 (2007)
- Jester, S., K. Meisenheimer, A. R. Martel, E. S. Perlman, W. B. Sparks: HUBBLE Space Telescope far-ultraviolet imaging of the jet in 3C273: a common emission component from optical to X-rays. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 380, 828-834 (2007)
- Jiang, L., X. Fan, M. Vestergaard, J. Kurk, F. Walter, B. C. Kelly, M. Strauss: Gemini near-infrared spectroscopy of luminous $z \sim 6$ quasars: chemical abundances, black hole masses, and MgII absorption. *The Astronomical Journal* 134, 1150-1161 (2007)
- Joergens, V., A. Müller: 16-20 M_{J} radial velocity companion orbiting the brown dwarf candidate Cha Ha 8. *The Astrophysical Journal* 666, L113-L116 (2007)
- Johansen, A., J. S. Oishi, M.-M. M. Low, H. Klahr, T. Henning, A. Youdin: Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks. *Nature* 448, 1022-1025 (2007)
- Johansen, A., A. Youdin: Protoplanetary disk turbulence driven by the streaming instability: nonlinear saturation and particle concentration. *The Astrophysical Journal* 662, 627-641 (2007)
- Johnas, C. M. S., E. W. Guenther, V. Joergens, A. Schweitzer, P. H. Hauschildt: Lithium abundances of very low mass members of Chamaeleon I. *Astronomy and Astrophysics* 475, 667-675 (2007)
- Jonkheid, B., C. P. Dullemond, M. R. Hogerheijde, E. F. van Dishoeck: Chemistry and line emission from evolving Herbig Ae disks. *Astronomy and Astrophysics* 463, 203-216 (2007)
- Juhász, A., T. Prusti, P. Ábrahám, C. P. Dullemond: Long-term infrared variability of the UX Ori-type star SV Cep. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 374, 1242-1252 (2007)
- Kang, X., F. C. van den Bosch, A. Pasquali: On the origin of the dichotomy of early-type galaxies: the role of dry mergers and active galactic nucleus feedback. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 381, 389-400 (2007)
- Kang, X., F. C. van den Bosch, X. Yang, S. Mao, H. J. Mo, C. Li, Y. P. Jing: The alignment between satellites and central galaxies: theory versus observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 378, 1531-1542 (2007)
- Kasper, M., D. Apai, M. Janson, W. Brandner: A novel L-band imaging search for giant planets in the Tucana and b Pictoris moving groups. *Astronomy and Astrophysics* 472, 321-327 (2007)
- Kennicutt, R. C., Jr., D. Calzetti, F. Walter, G. Helou, D. J. Hollenbach, L. Armus, G. Bendo, D. A. Dale, B. T. Draine, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, M. K. M. Prescott, M. W. Regan, M. D. Thornley, C. Bot, E. Brinks, E. de Blok, D. de Mello, M. Meyer, J. Moustakas, E. J. Murphy, K. Sheth, J. D. T. Smith: Star formation in NGC 5194 (M51a). II. The spatially resolved star-formation law. *The Astrophysical Journal* 671, 333-348 (2007)
- Kessler-Silacci, J. E., C. P. Dullemond, J. C. Augereau, B. Merín, V. C. Geers, E. F. van Dishoeck, N. J. Evans, II, G. A. Blake, J. Brown: Probing protoplanetary disks with silicate emission: Where is the silicate emission zone? *The Astrophysical Journal* 659, 680-684 (2007)
- Kitching, T. D., A. F. Heavens, A. N. Taylor, M. L.

- Brown, K. Meisenheimer, C. Wolf, M. E. Gray, D. J. Bacon: Cosmological constraints from COMBO-17 using 3D weak lensing. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 376, 771-778 (2007)
- Knudsen, K. K., F. Walter, A. Weiss, A. Bolatto, D. A. Riechers, K. Menten: New insights on the dense molecular gas in NGC 253 as traced by HCN and HCO⁺. *The Astrophysical Journal* 156-164 (2007)
- Kodama, T., I. Tanaka, M. Kajisawa, J. Kurk, B. Venemans, C. De Breuck, J. Vernet, C. Lidman: The first appearance of the red sequence of galaxies in proto-clusters at $2 < z < 3$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 377, 1717-1725 (2007)
- Koposov, S., J. T. A. de Jong, V. Belokurov, H. W. Rix, D. B. Zucker, N. W. Evans, G. Gilmore, M. J. Irwin, E. F. Bell: The discovery of two extremely low luminosity Milky Way globular clusters. *The Astrophysical Journal* 669, 337-342 (2007)
- Körding, E. G., S. Jester, R. Fender: Measuring the accretion rate and kinetic luminosity functions of supermassive black holes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 383, 277-288 (2007)
- Kornet, K., S. Wolf, M. Rózycka: On the diversity of giant planets – Simulating the evolution of solids in protoplanetary disks. *Planetary and Space Science* 55, 536-546 (2007)
- Kovac, K., R. S. Somerville, J. E. Rhoads, S. Malhotra, J. Wang: Clustering of Ly α emitters at $z \sim 4.5$. *The Astrophysical Journal* 668, 15-22 (2007)
- Krause, M., C. Fendt, N. Neininger: Magnetic interaction of jets and molecular clouds in NGC 4258. *Astronomy and Astrophysics* 467, 1037-1048 (2007)
- Krause, O., C. Fendt, N. Neininger: Magnetic interaction of jets and molecular clouds in NGC 4258. *Astronomy & Astrophysics* 467, 1037-1048 (2007)
- Krips, M., A. Eckart, T. P. Krichbaum, J. U. Pott, S. Leon, R. Neri, S. García-Burillo, F. Combes, F. Boone, A. J. Baker, L. J. Tacconi, E. Schinnerer, L. K. Hunt: NUCli of GALaxies. V. Radio emission in 7 NUGA sources. *Astronomy and Astrophysics* 464, 553-563 (2007)
- Krips, M., R. Neri, S. Garcia-Burillo, F. Combes, E. Schinnerer, A. J. Baker, A. Eckart, F. Boone, L. Hunt, S. Leon, L. J. Tacconi: Molecular Gas in NUCli of GALaxies (NUGA): VI. Detection of a molecular gas disk/torus via HCN in the Seyfert2 galaxy NGC 6951? *Astronomy and Astrophysics* 468, L63-L66 (2007)
- Kurk, J., F. Walter, X. Fan, L. Jiang, D. Riechers, H. W. Rix, L. Pentericci, M. Strauss, C. Carilli, S. Wagner: Black hole masses and enrichment of $z \sim 6$ SDSS quasars. *The Astrophysical Journal* 669, 32-44 (2007)
- Labadie, L., E. Le Coarer, R. Maurand, P. Labeye, P. Kern, B. Arezki, J. E. Broquin: Mid-infrared laser light nulling experiment using single-mode conductive waveguides. *Astronomy and Astrophysics* 471, 355-360 (2007)
- Labbé, I., M. Franx, G. Rudnick, N. Forster Schreiber, P. van Dokkum, A. Moorwood, H. W. Rix, H. Rottgering, I. Trujillo, P. van der Werf: The color magnitude distribution of field galaxies to $z \sim 3$: the evolution and modeling of the blue sequence. *The Astrophysical Journal* 665, 944-972 (2007)
- Lane, K. P., M. E. Gray, A. Aragón-Salamanca, C. Wolf, K. Meisenheimer: Galaxy morphologies and environment in the Abell 901/902 supercluster from COMBO-17. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 378, 716-722 (2007)
- Lara, L. M., H. Boehnhardt, R. Gredel, P. J. Gutiérrez, R. Rodrigo, M. J. Vidal-Nuñez: Behavior of comet 9P/Tempel 1 around the Deep Impact event. *Astronomy and Astrophysics* 465, 1061-1067 (2007)
- Lee, C.-F., P. T. P. Ho, N. Hirano, H. Beuther, T. L. Bourke, H. Shang, Q. Zhang: HH 212: Submillimeter Array observations of a remarkable protostellar jet. *The Astrophysical Journal* 659, 499-511 (2007)
- Lehmer, B. D., W. N. Brandt, D. M. Alexander, E. F. Bell, D. H. McIntosh, F. E. Bauer, G. Hasinger, V. Mainieri, T. Miyaji, D. P. Schneider, A. T. Steffen: The X-ray evolution of early-type galaxies in the Extended CHANDRA Deep Field-South. *The Astrophysical Journal* 657, 681-699 (2007)
- Lehtinen, K., D. Russeil, M. Juvela, K. Mattila, D. Lemke: ISO far infrared observations of the high latitude cloud L1642. II. Correlated variations of far infrared emissivity and temperature of »classical large« dust particles. *Astronomy and Astrophysics* 466, 969-976 (2007)
- Leinert, C., B. Moster: Evidence for dust accumulation just outside the orbit of Venus. *Astronomy and Astrophysics* 472, 335-340 (2007)
- Leon, S., A. Eckart, S. Laine, J. K. Kotilainen, E. Schinnerer, S. W. Lee, M. Krips, J. Reunanen, J. Scharwächter: Nuclear starburst-driven evolution of the central region in NGC 6764. *Astronomy and Astrophysics* 473, 747-759 (2007)
- Leroy, A., A. Bolatto, S. Stanimirovic, N. Mizuno, F. Israel, C. Bot: The SPITZER Survey of the Small Magellanic Cloud: far-infrared emission and cold gas in the Small Magellanic Cloud. *The Astrophysical Journal* 658, 1027-1046 (2007)
- Leroy, A., J. Cannon, F. Walter, A. Bolatto, A. Weiss: The low CO content of the extremely metal poor galaxy I Zw 18. *The Astrophysical Journal* 663, 990-994 (2007)
- Letawe, G., P. Magain, F. Courbin, P. Jablonka, K. Jahnke, G. Meylan, L. Wisotzki: On-axis spectroscopy of the host galaxies of 20 optically luminous quasars at $z \sim 0.3$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 378, 83-108 (2007)
- Leurini, S., H. Beuther, P. Schilke, F. Wyrowski, Q. Zhang, K. M. Menten: Multi-line (sub)millimetre observations of the high-mass proto cluster IRAS 05358 + 3543. *Astronomy and Astrophysics* 475, 925-939 (2007)
- Li, C., Y. P. Jing, G. Kauffmann, G. Börner, X. Kang, L. Wang: Luminosity dependence of the spatial and velocity distributions of galaxies: semi-analytic models versus the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 376, 984-996 (2007)

- Li, Y., H. J. Mo, F. C. van den Bosch, W. P. Lin: On the assembly history of dark matter haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 379, 689-701 (2007)
- Lilly, S. J., O. Le Fevre, A. Renzini, G. Zamorani, M. Scodreggio, T. Contini, C. M. Carollo, G. Hasinger, J. P. Kneib, A. Iovino, V. Le Brun, C. Maier, V. Mainieri, M. Mignoli, J. Silverman, L. A. M. Tasca, M. Bolzonella, A. Bongiorno, D. Bottini, P. Capak, K. Caputi, A. Cimatti, O. Cucciati, E. Daddi, R. Feldmann, P. Franzetti, B. Garilli, L. Guzzo, O. Ilbert, P. Kampczyk, K. Kovac, F. Lamareille, A. Leauthaud, J. F. Le Borgne, H. J. McCracken, C. Marinoni, R. Pello, E. Ricciardelli, C. Scarlata, D. Vergani, D. B. Sanders, E. Schinnerer, N. Scoville, Y. Taniguchi, S. Arnouts, H. Aussel, S. Bardelli, M. Brusa, A. Cappi, P. Ciliegi, A. Finoguenov, S. Foucaud, R. Franceschini, C. Halliday, C. Impey, C. Knobel, A. Koekemoer, J. Kurk, D. Maccagni, S. Maddox, B. Marano, G. Marconi, B. Meneux, B. Mobasher, C. Moreau, J. A. Peacock, C. Porciani, L. Pozzetti, R. Scaramella, D. Schiminovich, P. Shopbell, I. Smail, D. Thompson, L. Tresse, G. Vettolani, A. Zanichelli, E. Zucca: z COSMOS: a large VLT/VIMOS redshift survey covering $0 < z < 3$ in the COSMOS field. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 70-85 (2007)
- Limousin, M., J. Richard, E. Jullo, J. P. Kneib, B. Fort, G. Soucail, A. Elíasdóttir, P. Natarajan, R. S. Ellis, I. Smail, O. Czoske, G. P. Smith, P. Hudelot, S. Bardeau, H. Ebeling, E. Egami, K. K. Knudsen: COMBINING strong and weak gravitational lensing in Abell 1689. *The Astrophysical Journal* 668, 643-666 (2007)
- Lisenfeld, U., C. Mundell, J. Allsopp, E. Schinnerer: Molecular gas in Arp 94: implications for intergalactic star formation. *New Astronomy Review* 51, 63-66 (2007)
- Llamas-Jansa, I., C. Jäger, H. Mutschke, T. Henning: Far-ultraviolet to near-infrared optical properties of carbon nanoparticles produced by pulsed-laser pyrolysis of hydrocarbons and their relation with structural variations. *Carbon* 1542-1557 (2007)
- Macciò, A. V., A. A. Dutton, F. C. van den Bosch, B. Moore, D. Potter, J. Stadel: Concentration, spin and shape of dark matter haloes: scatter and the dependence on mass and environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 378, 55-71 (2007)
- Maddox, L. A., J. J. Cowan, R. E. Kilgard, E. Schinnerer, C. J. Stockdale: A study of compact radio sources in nearby face-on spiral galaxies. II. Multiwavelength analyses of sources in M51. *The Astronomical Journal* 133, 2559-2568 (2007)
- Mainieri, V., G. Hasinger, N. Cappelluti, M. Brusa, H. Brunner, F. Civano, A. Comastri, M. Elvis, A. Finoguenov, F. Fiore, R. Gilli, I. Lehmann, J. Silverman, L. Tasca, C. Vignali, G. Zamorani, E. Schinnerer, C. Impey, J. Trump, S. Lilly, C. Maier, R. E. Griffiths, T. Miyaji, P. Capak, A. Koekemoer, N. Scoville, P. Shopbell, Y. Taniguchi: The XMM-Newton Wide-Field Survey in the COSMOS Field. IV. X-ray spectral properties of Active Galactic Nuclei. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 368-382 (2007)
- Maiolino, R., R. Neri, A. Beelen, F. Bertoldi, C. L. Carilli, P. Caselli, P. Cox, K. M. Menten, T. Nagao, A. Omont, C. M. Walmsley, F. Walter, A. Weiß: Molecular gas in QSO host galaxies at $z > 5$. *Astronomy and Astrophysics* 472, L33-L37 (2007)
- Maraston, C., E. Daddi, A. Renzini, A. Cimatti, M. Dickinson, C. Papovich, A. Pasquali, N. Pirzkal: Erratum: »Evidence for TP-AGB stars in high-redshift galaxies, and their effect on deriving stellar population parameters« *The Astrophysical Journal* 656, 1241-1241 (2007)
- Markwick-Kemper, F., S. C. Gallagher, D. C. Hines, J. Bouwman: Dust in the wnd: crystalline silicates, corundum, and periclase in PG 2112+059. *The Astrophysical Journal* 668, L107-L110 (2007)
- Martin, N. F., R. A. Ibata, S. C. Chapman, M. Irwin, G. F. Lewis: A Keck/DEIMOS spectroscopic survey of faint galactic satellites: searching for the least massive dwarf galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 380, 281-300 (2007)
- Martin, N. F., R. A. Ibata, M. Irwin: Galactic halo stellar structures in the Triangulum-Andromeda region. *The Astrophysical Journal* 668, L123-L126 (2007)
- Martínez-Sansigre, A., S. Rawlings, D. G. Bonfield, S. Mateos, C. Simpson, M. Watson, O. Almaini, S. Foucaud, K. Sekiguchi, Y. Ueda: Evidence for a large fraction of Compton-thick quasars at high redshift. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 379, L6-L10 (2007)
- Maulbetsch, C., V. Avila-Reese, P. Colín, S. Gottlöber, A. Khalatyan, M. Steinmetz: The dependence of the mass assembly history of cold dark matter halos on environment. *The Astrophysical Journal* 654, 53-65 (2007)
- Meisenheimer, K., K. R. W. Tristram, W. Jaffe, F. Israel, N. Neumayer, D. Raban, H. Röttgering, W. D. Cotton, U. Graser, T. Henning, C. Leinert, B. Lopez, G. Perrin, A. Prieto: Resolving the innermost parsec of Centaurus A at mid-infrared wavelengths. *Astronomy and Astrophysics* 471, 453-465 (2007)
- Menéndez-Delmestre, K., K. Sheth, E. Schinnerer, T. H. Jarrett, N. Z. Scoville: A near-infrared study of 2MASS bars in local galaxies: an anchor for high-redshift studies. *The Astrophysical Journal* 657, 790-804 (2007)
- Menut, J. L., E. Gendron, M. Schartmann, P. Tuthill, B. Lopez, W. C. Danchi, S. Wolf, A. M. Lagrange, S. Flament, D. Rouan, Y. Clénet, N. Berruyer: The carbon star IRC+10216: linking the complex inner region with its spherical large-scale structures. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 376, L7-L10 (2007)
- Merín, B., J. C. Augereau, E. F. van Dishoeck, J. Kessler-Silacci, C. P. Dullemond, G. A. Blake, F. Lahuis, J. M. Brown, V. C. Geers, K. M. Pontoppidan, F. Comerón, A. Frasca, S. Guieu, J. M. Alcalá, A. C. A. Boogert, N. J. Evans, II, P. D'Alessio, L. G. Mundy, N. Chapman: Abundant crystalline silicates in the disk of a very low mass star. *The Astrophysical Journal* 661, 361-367 (2007)
- Michielsen, D., M. Koleva, P. Prugniel, W. W. Zeilinger, S.

- De Rijcke, H. Dejonghe, A. Pasquali, I. Ferreras, V. P. Debattista: Toward a solution for the Ca II triplet puzzle: results from dwarf elliptical galaxies. *The Astrophysical Journal* 670, L101-L104 (2007)
- Momjian, E., C. L. Carilli, D. A. Riechers, F. Walter: High sensitivity array observations of the $z = 4.4$ QSO BRI 1335-0417. *The Astronomical Journal* 134, 694-697 (2007)
- Monaco, P., F. Fontanot, G. Taffoni: The MORGANA model for the rise of galaxies and active nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 375, 1189-1219 (2007)
- Moro-Martín, A., J. M. Carpenter, M. R. Meyer, L. A. Hillenbrand, R. Malhotra, D. Hollenbach, J. Najita, T. Henning, J. S. Kim, J. Bouwman, M. D. Silverstone, D. C. Hines, S. Wolf, I. Pascucci, E. E. Mamajek, J. Lunine: Are debris disks and massive planets correlated? *The Astrophysical Journal* 658, 1312-1321 (2007)
- Moro-Martín, A., R. Malhotra, J. M. Carpenter, L. A. Hillenbrand, S. Wolf, M. R. Meyer, D. Hollenbach, J. Najita, T. Henning: The dust, planetesimals, and planets of HD 38529. *The Astrophysical Journal* 668, 1165-1173 (2007)
- Mundell, C. G., G. Dumas, E. Schinnerer, N. Nagar, S. Haan, E. Wilcots, A. S. Wilson, E. Emsellem, P. Ferruit, R. F. Peletier, P. T. de Zeeuw: 3D studies of neutral and ionised gas and stars in Seyfert and inactive galaxies. *New Astronomy Review* 51, 34-37 (2007)
- Murayama, T., Y. Taniguchi, N. Z. Scoville, M. Ajiki, D. B. Sanders, B. Mobasher, H. Aussel, P. Capak, A. Koekemoer, Y. Shioya, T. Nagao, C. Carilli, R. S. Ellis, B. Garilli, M. Giavalisco, M. G. Kitzbichler, O. Le Fèvre, D. Maccagni, E. Schinnerer, V. Smolcic, S. Tribiano, A. Cimatti, Y. Komiyama, S. Miyazaki, S. S. Sasaki, J. Koda, H. Karoji: Lya emitters at redshift 5.7 in the COSMOS field. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 523-544 (2007)
- Neumayer, N., M. Cappellari, J. Reunanen, H. W. Rix, P. P. van der Werf, P. T. de Zeeuw, R. I. Davies: The central parsecs of Centaurus A: high-excitation gas, a molecular disk, and the mass of the black hole. *The Astrophysical Journal* 671, 1329-1344 (2007)
- Newberg, H. J., B. Yanny, N. Cole, T. C. Beers, P. Re Fiorentin, D. P. Schneider, R. Wilhelm: The overdensity in Virgo, Sagittarius Debris, and the asymmetric spheroid. *The Astrophysical Journal* 668, 221-235 (2007)
- Nielbock, M., R. Chini, V. H. Hoffmeister, C. M. Scheyda, J. Steinacker, D. Nürnberger, R. Siebenmorgen: The morphology of M 17-UC1: a disk candidate surrounding a hypercompact H II region. *The Astrophysical Journal* 656, L81-L84 (2007)
- Noeske, K. G., S. M. Faber, B. J. Weiner, D. C. Koo, J. R. Primack, A. Dekel, C. Papovich, C. J. Conselice, E. Le Floch, G. H. Rieke, A. L. Coil, J. M. Lotz, R. S. Somerville, K. Bundy: Star formation in AEGIS field galaxies since $z = 1.1$: staged galaxy formation and a model of mass-dependent gas exhaustion. *The Astrophysical Journal* 660, L47-L50 (2007)
- Noeske, K. G., B. J. Weiner, S. M. Faber, C. Papovich, D. C. Koo, R. S. Somerville, K. Bundy, C. J. Conselice, J. A. Newman, D. Schiminovich, E. Le Floch, A. L. Coil, G. H. Rieke, J. M. Lotz, J. R. Primack, P. Barmby, M. C. Cooper, M. Davis, R. S. Ellis, G. G. Fazio, P. Guhathakurta, J. Huang, S. A. Kassin, D. C. Martin, A. C. Phillips, R. M. Rich, T. A. Small, C. N. A. Willmer, G. Wilson: Star formation in AEGIS field galaxies since $z = 1.1$: the dominance of gradually declining star formation, and the main sequence of star-forming galaxies. *The Astrophysical Journal* 660, L43-L46 (2007)
- Oesch, P. A., M. Stiavelli, C. M. Carollo, L. E. Bergeron, A. M. Koekemoer, R. A. Lucas, C. M. Pavlovsky, M. Trenti, S. J. Lilly, S. V. W. Beckwith, T. Dahlen, H. C. Ferguson, J. P. Gardner, C. Lacey, B. Mobasher, N. Panagia, H. W. Rix: The UDF05 follow-up of the HUBBLE Ultra Deep Field. I. The faint-end slope of the Lyman Break galaxy population at $z \sim 5$. *The Astrophysical Journal* 671, 1212-1226 (2007)
- Palau, A., R. Estalella, J. M. Girart, P. T. P. Ho, Q. Zhang, H. Beuther: Star formation in a clustered environment around the UCH {II} region in IRAS 20293 + 3952. *Astronomy and Astrophysics* 465, 219-233 (2007)
- Palau, A., R. Estalella, P. T. P. Ho, H. Beuther, M. T. Beltrán: Unveiling the nature and interaction of the intermediate/high-mass YSOs in IRAS 20343 + 4129. *Astronomy and Astrophysics* 474, 911-922 (2007)
- Pascucci, I., D. Hollenbach, J. Najita, J. Muzerolle, U. Gorti, G. J. Herczeg, L. A. Hillenbrand, J. S. Kim, J. M. Carpenter, M. R. Meyer, E. E. Mamajek, J. Bouwman: Detection of [Ne II] emission from young circumstellar disks. *The Astrophysical Journal* 663, 383-393 (2007)
- Pasquali, A., F. C. van den Bosch, H. W. Rix: The isophotal structure of early-type galaxies in the SDSS: dependence on active galactic nucleus activity and environment. *The Astrophysical Journal* 664, 738-749 (2007)
- Pasquini, L., M. P. Döllinger, A. Weiss, L. Girardi, C. Chavero, A. P. Hatzes, L. da Silva, J. Setiawan: Evolved stars suggest an external origin of the enhanced metallicity in planet-hosting stars. *Astronomy and Astrophysics* 473, 979-982 (2007)
- Pavlyuchenkov, Y., C. P. Dullemond: Dust crystallinity in protoplanetary disks: the effect of diffusion/viscosity ratio. *Astronomy and Astrophysics* 471, 833-840 (2007)
- Pavlyuchenkov, Y., T. Henning, D. Wiebe: Do we need to know the temperature in prestellar cores? *The Astrophysical Journal* 669, L101-L104 (2007)
- Pavlyuchenkov, Y., D. Semenov, T. Henning, S. Guilloteau, V. Piétu, R. Launhardt, A. Dutrey: Molecular line radiative transfer in protoplanetary disks: Monte Carlo simulations versus approximate methods. *The Astrophysical Journal* 669, 1262-1278 (2007)
- Perrin, G., T. Verhoelst, S. T. Ridgway, J. Cami, Q. N. Nguyen, O. Chesneau, B. Lopez, C. Leinert, A. Richichi: The molecular and dusty composition of Betelgeuse's inner circumstellar environment. *Astronomy and Astrophysics* 474, 599-608 (2007)

- Phleps, S., C. Wolf, J. A. Peacock, K. Meisenheimer, E. van Kampen: COMBO-17 measurements of the effect of environment on the type-dependent galaxy luminosity function. *Astronomy and Astrophysics* 468, 113-120 (2007)
- Pizagno, J., F. Prada, D. H. Weinberg, H.-W. Rix, R. W. Pogge, E. K. Grebel, D. Harbeck, M. Blanton, J. Brinkmann, J. E. Gunn: The Tully-Fisher relation and its residuals for a broadly selected sample of galaxies. *The Astronomical Journal* 134, 945-972 (2007)
- Pontoppidan, K. M., C. P. Dullemond, G. A. Blake, A. C. A. Boogert, E. F. van Dishoeck, N. J. Evans, II, J. Kessler-Silacci, F. Lahuis: Modeling SPITZER observations of VV Ser. I. The circumstellar disk of a UX Orionis star. *The Astrophysical Journal* 656, 980-990 (2007)
- Pontoppidan, K. M., C. P. Dullemond, G. A. Blake, N. J. Evans, II, V. C. Geers, P. M. Harvey, W. Spiesman: Modeling SPITZER observations of VV Ser. II. An extended quantum-heated nebula and a disk shadow. *The Astrophysical Journal* 656, 991-1000 (2007)
- Pontoppidan, K. M., K. R. Stapelfeldt, G. A. Blake, E. F. van Dishoeck, C. P. Dullemond: Deep SPITZER spectroscopy of the »Flying Saucer« edge-on disk: large grains beyond 50 AU. *The Astrophysical Journal* 658, L111-L114 (2007)
- Posch, T., A. Baier, H. Mutschke, T. Henning: Carbonates in space: the challenge of low-temperature data. *The Astrophysical Journal* 668, 993-1000 (2007)
- Posch, T., H. Mutschke, M. Trieloff, T. Henning: Infrared spectroscopy of calcium-aluminium-rich inclusions: analog material for protoplanetary dust? *The Astrophysical Journal* 656, 615-620 (2007)
- Qiu, K., Q. Zhang, H. Beuther, J. Yang: High-resolution imaging of molecular outflows in massive young stars. *The Astrophysical Journal* 654, 361-372 (2007)
- Quanz, S. P., D. Apai, T. Henning: Dust rings and filaments around the isolated young star V1331 Cygni. *The Astrophysical Journal* 656, 287-292 (2007)
- Quanz, S. P., T. Henning, J. Bouwman, H. Linz, F. Lahuis: Deeply embedded objects and shocked molecular hydrogen: the environment of the FU Orionis stars RNO 1B/1C. *The Astrophysical Journal* 658, 487-497 (2007)
- Quanz, S. P., T. Henning, J. Bouwman, R. van Boekel, A. Juhász, H. Linz, K. M. Pontoppidan, F. Lahuis: Evolution of dust and ice features around FU Orionis objects. *The Astrophysical Journal* 668, 359-383 (2007)
- Ratzka, T., C. Leinert, T. Henning, J. Bouwman, C. P. Dullemond, W. Jaffe: High spatial resolution mid-infrared observations of the low-mass young star TW Hydrae. *Astronomy and Astrophysics* 471, 173-185 (2007)
- Ravikumar, C. D., M. Puech, H. Flores, D. Proust, F. Hammer, M. Lehnert, A. Rawat, P. Amram, C. Balkowski, D. Burgarella, P. Cassata, C. Cesarsky, A. Cimatti, F. Combes, E. Daddi, H. Dannerbauer, S. di Serego Alighieri, D. Elbaz, B. Guiderdoni, A. Kembhavi, Y. C. Liang, L. Pozzetti, D. Vergani, J. Vernet, H. Wozniak, X. Z. Zheng: New spectroscopic redshifts from the CDFS and a test of the cosmological relevance of the GOODS-South field. *Astronomy and Astrophysics* 465, 1099-1108 (2007)
- Ravikumar, C. D., M. Puech, H. Flores, D. Proust, F. Hammer, M. Lehnert, A. Rawat, P. Amram, C. Balkowski, D. Burgarella, P. Cassata, C. Cesarsky, A. Cimatti, F. Combes, E. Daddi, H. Dannerbauer, S. di Serego Alighieri, D. Elbaz, B. Guiderdoni, A. Kembhavi, Y. C. Liang, L. Pozzetti, D. Vergani, J. Vernet, H. Wozniak, X. Z. Zheng: 531 New spectroscopic redshifts from the CDFS and a test on the cosmological relevance of the Goods-South field. *Astronomy & Astrophysics* 465, 1099-1108 (2007)
- Re Fiorentin, P., C. A. L. Bailer-Jones, Y. S. Lee, T. C. Beers, T. Sivarani, R. Wilhelm, C. Allende Prieto, J. E. Norris: Estimation of stellar atmospheric parameters from SDSS / SEGUE spectra. *Astronomy and Astrophysics* 467, 1373-1387 (2007)
- Riechers, D. A., F. Walter, C. L. Carilli, F. Bertoldi: Observations of dense molecular gas in a quasar host galaxy at $z = 6.42$: further evidence for a nonlinear dense gas-star formation relation at early cosmic times. *The Astrophysical Journal* 671, L13-L16 (2007)
- Riechers, D. A., F. Walter, P. Cox, C. L. Carilli, A. Weiss, F. Bertoldi, R. Neri: Detection of emission from the CN radical in the cloverleaf quasar at $z = 2.56$. *The Astrophysical Journal* 666, 778-783 (2007)
- Robaina, A. R., J. Cepa: Redshift-distance relations from type Ia supernova observations. New constraints on grey dust models. *Astronomy and Astrophysics* 464, 465-470 (2007)
- Robin, A. C., R. M. Rich, H. Aussel, P. Capak, L. A. M. Tasca, K. Jahnke, Y. Kakazu, J. P. Kneib, A. Koekemoer, A. C. Leauthaud, S. Lilly, B. Mobasher, N. Scoville, Y. Taniguchi, D. J. Thompson: The stellar content of the COSMOS field as derived from morphological and SED-based star/galaxy separation. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 545-559 (2007)
- Rochau, B., D. A. Gouliermis, W. Brandner, A. E. Dolphin, T. Henning: The star-forming region NGC 346 in the Small Magellanic Cloud with HUBBLE Space Telescope ACS observations. II. Photometric study of the intermediate-age star cluster BS 90. *The Astrophysical Journal* 664, 322-331 (2007)
- Rouillé, G., M. Arold, A. Staicu, S. Krasnokutski, F. Huisken, T. Henning, X. Tan, F. Salama: $S_1(^1A_1) \leftarrow S_0(^1A_1)$ transition of benzo [g, h, i] perylene in supersonic jets and rare gas matrices. *Journal of Chemical Physics* 126, 4311 (2007)
- Roussel, H., G. Helou, D. J. Hollenbach, B. T. Draine, J. D. Smith, L. Armus, E. Schinnerer, F. Walter, C. W. Engelbracht, M. D. Thornley, R. C. Kennicutt, D. Calzetti, D. A. Dale, E. J. Murphy, C. Bot: Warm molecular hydrogen in the SPITZER SINGS galaxy sample. *The Astrophysical Journal* 669, 959-981 (2007)
- Sabbi, E., M. Sirianni, A. Nota, M. Tosi, J. Gallagher, M. Meixner, M. S. Oey, R. Walterbos, A. Pasquali, L. J. Smith, L. Angeretti: Erratum: »Past and present star for-

- mation in the SMC: NGC 346 and its neighborhood« *The Astronomical Journal* 133, 2430-2430 (2007)
- Sabbi, E., M. Sirianni, A. Nota, M. Tosi, J. Gallagher, M. Meixner, M. S. Oey, R. Walterbos, A. Pasquali, L. J. Smith, L. Angeretti: Past and present star formation in the SMC: NGC 346 and its neighborhood. *The Astronomical Journal* 133, 44-57 (2007)
- Sanders, D. B., M. Salvato, H. Aussel, O. Ilbert, N. Scoville, J. A. Surace, D. T. Frayer, K. Sheth, G. Helou, T. Brooke, B. Bhattacharya, L. Yan, J. Kartaltepe, J. E. Barnes, A. W. Blain, D. Calzetti, P. Capak, C. Carilli, C. M. Carollo, A. Comastri, E. Daddi, R. S. Ellis, M. Elvis, M. Fall, A. Franceschini, M. Giavalisco, G. Hasinger, C. Impey, A. Koekemoer, O. Le Fevre, S. Lilly, M. C. Liu, H. J. McCracken, B. Mobasher, A. Renzini, M. Rich, E. Schinnerer, P. L. Shopbell, Y. Taniguchi, D. J. Thompson, C. M. Urry, J. P. Williams: The SPITZER Legacy survey of the HST-ACS 2 sq. deg. COSMOS field: survey strategy and first analysis. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 86-98 (2007)
- Sanders, D. B., M. Salvato, H. Aussel, O. Ilbert, N. Scoville, J. A. Surace, D. T. Frayer, K. Sheth, G. Helou, T. Brooke, B. Bhattacharya, L. Yan, J. S. Kartaltepe, J. E. Barnes, A. W. Blain, D. Calzetti, P. Capak, C. Carilli, C. M. Carollo, A. Comastri, E. Daddi, R. S. Ellis, M. Elvis, S. M. Fall, A. Franceschini, M. Giavalisco, G. Hasinger, C. Impey, A. Koekemoer, O. Le Fèvre, S. Lilly, M. C. Liu, H. J. McCracken, B. Mobasher, A. Renzini, M. Rich, E. Schinnerer, P. L. Shopbell, Y. Taniguchi, D. J. Thompson, C. M. Urry, J. P. Williams: S-COSMOS: the SPITZER Legacy survey of the HUBBLE Space Telescope ACS 2 deg² COSMOS Field I: survey strategy and first analysis. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 86-98 (2007)
- Sasaki, S. S., Y. Taniguchi, N. Scoville, B. Mobasher, H. Aussel, D. B. Sanders, A. Koekemoer, M. Ajiki, Y. Komiyama, S. Miyazaki, N. Kaifu, H. Karoji, S. Okamura, N. Arimoto, K. Ohta, Y. Shioya, T. Murayama, T. Nagao, J. Koda, L. Hainline, A. Renzini, M. Giavalisco, O. Le Fèvre, C. Impey, M. Elvis, S. Lilly, M. Rich, E. Schinnerer, K. Sheth: A potential galaxy threshing system in the COSMOS field. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 511-517 (2007)
- Schinnerer, E., T. Böker, E. Emsellem, D. Downes: Bar-driven mass build-up within the central 50 pc of NGC 6946. *Astronomy and Astrophysics* 462, L27-L30 (2007)
- Schinnerer, E., V. Smolcic, C. L. Carilli, M. Bondi, P. Ciliegi, K. Jahnke, N. Z. Scoville, H. Aussel, F. Bertoldi, A. W. Blain, C. D. Impey, A. M. Koekemoer, O. Le Fevre, C. M. Urry: The VLA-COSMOS Survey. II. Source catalog of the large project. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 46-69 (2007)
- Schneider, D. P., P. B. Hall, G. T. Richards, M. A. Strauss, D. E. Vanden Berk, S. F. Anderson, W. N. Brandt, X. Fan, S. Jester, J. Gray, J. E. Gunn, M. U. SubbaRao, A. R. Thakar, C. Stoughton, A. S. Szalay, B. Yanny, D. G. York, N. A. Bahcall, J. Barentine, M. R. Blanton, H. Brewington, J. Brinkmann, R. J. Brunner, F. J. Castander, I. Csabai, J. A. Frieman, M. Fukugita, M. Harvanek, D. W. Hogg, Z. Ivezić, S. M. Kent, S. J. Kleinman, G. R. Knapp, R. G. Kron, J. Krzesinski, D. C. Long, R. H. Lupton, A. Nitta, J. R. Pier, D. H. Saxe, Y. Shen, S. A. Snedden, D. H. Weinberg, J. Wu: The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. IV. Fifth Data Release. *The Astronomical Journal* 134, 102-117 (2007)
- Scoville, N., R. G. Abraham, H. Aussel, J. E. Barnes, A. Benson, A. W. Blain, D. Calzetti, A. Comastri, P. Capak, C. Carilli, J. E. Carlstrom, C. M. Carollo, J. Colbert, E. Daddi, R. S. Ellis, M. Elvis, S. P. Ewald, M. Fall, A. Franceschini, M. Giavalisco, W. Green, R. E. Griffiths, L. Guzzo, G. Hasinger, C. Impey, J. P. Kneib, J. Koda, A. Koekemoer, O. Lefevre, S. Lilly, C. T. Liu, H. J. McCracken, R. Massey, Y. Mellier, S. Miyazaki, B. Mobasher, J. Mould, C. Norman, A. Refregier, A. Renzini, J. Rhodes, M. Rich, D. B. Sanders, D. Schiminovich, E. Schinnerer, M. Scodeggio, K. Sheth, P. L. Shopbell, Y. Taniguchi, N. D. Tyson, C. M. Urry, L. Van Waerbeke, P. Vettolani, S. D. M. White, L. Yan: COSMOS: HUBBLE Space Telescope observations. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 38-45 (2007)
- Scoville, N., H. Aussel, A. Benson, A. Blain, D. Calzetti, P. Capak, R. S. Ellis, A. El-Zant, A. Finoguenov, M. Giavalisco, L. Guzzo, G. Hasinger, J. Koda, O. Le Fèvre, R. Massey, H. J. McCracken, B. Mobasher, A. Renzini, J. Rhodes, M. Salvato, D. B. Sanders, S. S. Sasaki, E. Schinnerer, K. Sheth, P. L. Shopbell, Y. Taniguchi, J. E. Taylor, D. J. Thompson: Large structures and galaxy evolution in COSMOS at $z < 1.1$. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 150-181 (2007)
- Scoville, N., H. Aussel, M. Brusa, P. Capak, C. M. Carollo, M. Elvis, M. Giavalisco, L. Guzzo, G. Hasinger, C. Impey, J. P. Kneib, O. LeFevre, S. J. Lilly, B. Mobasher, A. Renzini, R. M. Rich, D. B. Sanders, E. Schinnerer, D. Schiminovich, P. Shopbell, Y. Taniguchi, N. D. Tyson: The Cosmic Evolution Survey (COSMOS): overview. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 1-8 (2007)
- Ségall, M., R. A. Ibata, M. J. Irwin, N. F. Martin, S. Chapman: Draco, a flawless dwarf galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 375, 831-842 (2007)
- Sesar, B., Z. Ivezić, R. H. Lupton, M. Juric, J. E. Gunn, G. R. Knapp, N. De Lee, J. A. Smith, G. Miknaitis, H. Lin, D. Tucker, M. Doi, M. Tanaka, M. Fukugita, J. Holtzman, S. Kent, B. Yanny, D. Schlegel, D. Finkbeiner, N. Padmanabhan, C. M. Rockosi, N. Bond, B. Lee, C. Stoughton, S. Jester, H. Harris, P. Harding, J. Brinkmann, D. P. Schneider, D. York, M. W. Richmond, D. Vanden Berk: Exploring the variable sky with the Sloan Digital Sky Survey. *The Astronomical Journal* 134, 2236-2251 (2007)
- Setiawan, J., P. Weise, T. Henning, R. Launhardt, A. Müller, J. Rodmann: Evidence for a planetary companion around a nearby young star. *The Astrophysical Journal* 660, L145-L148 (2007)

- Sheffer, Y., M. Rogers, S. R. Federman, D. L. Lambert, R. Gredel: HUBBLE Space Telescope Survey of interstellar $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ in the solar neighborhood. *The Astrophysical Journal* 667, 1002-1016 (2007)
- Shi, Y., P. Ogle, G. H. Rieke, R. Antonucci, D. C. Hines, P. S. Smith, F. J. Low, J. Bouwman, C. Willmer: Aromatic features in AGNs: star-forming infrared luminosity function of AGN host galaxies. *The Astrophysical Journal* 669, 841-861 (2007)
- Shields, J. C., H.-W. Rix, M. Sarzi, A. J. Barth, A. V. Filippenko, L. C. Ho, D. H. McIntosh, G. Rudnick, W. L. W. Sargent: The survey of nearby nuclei with the Space Telescope Imaging Spectrograph: emission-line nuclei at HUBBLE Space Telescope resolution. *The Astrophysical Journal* 654, 125-137 (2007)
- Sicilia-Aguilar, A., L. W. Hartmann, D. Watson, C. Bohac, T. Henning, J. Bouwman: Silicate dust in evolved protoplanetary disks: growth, sedimentation, and accretion. *The Astrophysical Journal* 659, 1637-1660 (2007)
- Simon, P., M. Hettterscheidt, M. Schirmer, T. Erben, P. Schneider, C. Wolf, K. Meisenheimer: GaBoDS: the Garching-Bonn Deep Survey. VI. Probing galaxy bias using weak gravitational lensing. *Astronomy and Astrophysics* 461, 861-879 (2007)
- Skibba, R. A., R. K. Sheth, M. C. Martino: Satellite luminosities in galaxy groups. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 1079 (2007)
- Smith, J. D. T., L. Armus, D. A. Dale, H. Roussel, K. Sheth, B. A. Buckalew, T. H. Jarrett, G. Helou, R. C. Kennicutt, Jr.: Spectral mapping reconstruction of extended sources. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 119, 1133-1144 (2007)
- Smith, J. D. T., B. T. Draine, D. A. Dale, J. Moustakas, R. C. Kennicutt, Jr., G. Helou, L. Armus, H. Roussel, K. Sheth, G. J. Bendo, B. A. Buckalew, D. Calzetti, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, D. J. Hollenbach, A. Li, S. Malhotra, E. J. Murphy, F. Walter: The mid-infrared spectrum of star-forming galaxies: global properties of polycyclic aromatic hydrocarbon emission. *The Astrophysical Journal* 656, 770-791 (2007)
- Smolcic, V., E. Schinnerer, A. Finoguenov, I. Sakelliou, C. L. Carilli, C. S. Botzler, M. Brusa, N. Scoville, M. Ajiki, P. Capak, L. Guzzo, G. Hasinger, C. Impey, K. Jahnke, J. S. Kartaltepe, H. J. McCracken, B. Mobasher, T. Murayama, S. S. Sasaki, Y. Shioya, Y. Taniguchi, J. R. Trump: A wide-angle tail radio galaxy in the COSMOS field: evidence for cluster formation. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 295-313 (2007)
- Smolcic, V., D. B. Zucker, E. F. Bell, M. G. Coleman, H. W. Rix, E. Schinnerer, Z. Ivezić, A. Kniazev: Improved photometry of Sloan Digital Sky Survey crowded-field images: structure and dark matter content in the dwarf spheroidal galaxy Leo I. *The Astronomical Journal* 134, 1901-1915 (2007)
- Stickel, M., U. Klaas, D. Lemke: The ISOPHOT 170 μm Serendipity Survey. III. FIR statistics of optically identified galaxies. *Astronomy and Astrophysics* 466, 831-838 (2007)
- Stickel, M., O. Krause, U. Klaas, D. Lemke: The ISOPHOT 170 μm Serendipity Survey. IV. The far-infrared sky atlas. *Astronomy and Astrophysics* 466, 1205-1210 (2007)
- Stickel, M., O. Krause, U. Klaas, D. Lemke: The ISOPHOT 170 μm Serendipity Survey. IV. The far infrared sky atlas. *Astronomy & Astrophysics* 466, 1205-1210 (2007)
- Strassmeier, K. G., K. Agabi, L. Agnoletto, A. Allan, M. I. Andersen, W. Ansoerge, F. Bortoletto, R. Briguglio, J. T. Buey, S. Castellini, V. Coudé du Foresto, L. Damé, H. J. Deeg, C. Eiroa, G. Durand, D. Fappani, M. Frezzotti, T. Granzer, A. Gröschke, H. J. Kärcher, R. Lenzen, A. Mancini, C. Montanari, A. Mora, A. Pierre, O. Pirnay, F. Roncella, F. X. Schmider, I. Steele, J. W. V. Storey, N. F. H. Tothill, T. Travouillon, L. Vittuari: Telescope and instrument robotization at Dome C. *Astronomische Nachrichten* 328, 451-474 (2007)
- Takahashi, M. I., Y. Shioya, Y. Taniguchi, T. Murayama, M. Ajiki, S. S. Sasaki, O. Koizumi, T. Nagao, N. Z. Scoville, B. Mobasher, H. Aussel, P. Capak, C. Carilli, R. S. Ellis, B. Garilli, M. Giavalisco, L. Guzzo, G. Hasinger, C. Impey, M. G. Kitzbichler, A. Koekemoer, O. Le Fèvre, S. J. Lilly, D. Maccagni, A. Renzini, M. Rich, D. B. Sanders, E. Schinnerer, M. Scodeggio, P. Shopbell, V. Smolcic, S. Tribiano, Y. Ideue, S. Mihara: The [O II] 13727 luminosity function and star formation rate at $z \sim 1.2$ in the COSMOS 2 square degree field and the Subaru deep field. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 456-467 (2007)
- Taniguchi, Y., N. Scoville, T. Murayama, D. B. Sanders, B. Mobasher, H. Aussel, P. Capak, M. Ajiki, S. Miyazaki, Y. Komiyama, Y. Shioya, T. Nagao, S. S. Sasaki, J. Koda, C. Carilli, M. Giavalisco, L. Guzzo, G. Hasinger, C. Impey, O. LeFevre, S. Lilly, A. Renzini, M. Rich, E. Schinnerer, P. Shopbell, N. Kaifu, H. Karoji, N. Arimoto, S. Okamura, K. Ohta: The Cosmic Evolution Survey (COSMOS): SUBARU observations of the HST cosmos field. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 9-28 (2007)
- Tapken, C., I. Appenzeller, S. Noll, S. Richling, J. Heidt, E. Meinköhn, D. Mehlert: Ly α emission in high-redshift galaxies. *Astronomy and Astrophysics* 467, 63-72 (2007)
- Thilker, D. A., S. Boissier, L. Bianchi, D. Calzetti, A. Boselli, D. A. Dale, M. Seibert, R. Braun, D. Burgarella, A. Gil de Paz, G. Helou, F. Walter, R. C. Kennicutt, Jr., B. F. Madore, D. C. Martin, T. A. Barlow, K. Forster, P. G. Friedman, P. Morrissey, S. G. Neff, D. Schiminovich, T. Small, T. K. Wyder, J. Donas, T. M. Heckman, Y.-W. Lee, B. Milliard, R. M. Rich, A. S. Szalay, B. Y. Welsh, S. K. Yi: Ultraviolet and infrared diagnostics of star formation and dust in NGC 7331. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 173, 572-596 (2007)
- Toft, S., P. van Dokkum, M. Franx, I. Labbe, N. M. Förster Schreiber, S. Wuyts, T. Webb, G. Rudnick, A. Zirm, M. Kriek, P. van der Werf, J. P. Blakeslee, G. Illingworth, H. W. Rix, C. Papovich, A. Moorwood: HUBBLE Space Telescope and SPITZER Imaging of red and blue galaxies at $z \sim 2.5$: a correlation between size and star formation activity from compact quiescent galaxies to extended

- star-forming galaxies. *The Astrophysical Journal* 671, 285-302 (2007)
- Tristram, K. R. W.: Observations of AGN with MIDI. *New Astronomy Review* 51, 717-723 (2007)
- Tristram, K. R. W., K. Meisenheimer, W. Jaffe, M. Schartmann, H. W. Rix, C. Leinert, S. Morel, M. Wittkowski, H. Röttgering, G. Perrin, B. Lopez, D. Raban, W. D. Cotton, U. Graser, F. Paresce, T. Henning: Resolving the complex structure of the dust torus in the active nucleus of the Circinus galaxy. *Astronomy and Astrophysics* 474, 837-850 (2007)
- Trump, J. R., C. D. Impey, P. J. McCarthy, M. Elvis, J. P. Huchra, M. Brusa, G. Hasinger, E. Schinnerer, P. Capak, S. J. Lilly, N. Z. Scoville: Magellan spectroscopy of AGN candidates in the COSMOS field. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 172, 383-395 (2007)
- Tsalmantza, P., M. Kontizas, C. A. L. Bailer-Jones, B. Rocca-Volmerange, R. Korakitis, E. Kontizas, E. Livanou, A. Dapergolas, I. Bellas-Velidis, A. Vallenari, M. Fioc: Towards a library of synthetic galaxy spectra and preliminary results of classification and parametrization of unresolved galaxies for Gaia. *Astronomy and Astrophysics* 470, 761-770 (2007)
- Turner, N. J., T. Sano, N. Dziourkevitch: Turbulent mixing and the dead zone in protostellar disks. *The Astrophysical Journal* 659, 729-737 (2007)
- van Boekel, R.: Astrophysics: water worlds in the making. *Nature* 447, 535-536 (2007)
- van den Bosch, F. C., X. Yang, H. J. Mo, S. M. Weinmann, A. V. Macciò, S. More, M. Cacciato, R. Skibba, X. Kang: Towards a concordant model of halo occupation statistics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 376, 841-860 (2007)
- Visser, R., V. C. Geers, C. P. Dullemond, J. C. Augereau, K. M. Pontoppidan, E. F. van Dishoeck: PAH chemistry and IR emission from circumstellar disks. *Astronomy and Astrophysics* 466, 229-241 (2007)
- Voshchinnikov, N., G. Videen, T. Henning: Effective medium theories for irregular fluffy structures: aggregation of small particles. *Applied Optics* 46, 4065-4072 (2007)
- Walter, F., J. M. Cannon, H. Roussel, G. J. Bendo, D. Calzetti, D. A. Dale, B. T. Draine, G. Helou, R. C. Kennicutt, Jr., J. Moustakas, G. H. Rieke, L. Armus, C. W. Engelbracht, K. Gordon, D. J. Hollenbach, J. Lee, A. Li, M. J. Meyer, E. J. Murphy, M. W. Regan, J.-D. T. Smith, E. Brinks, W. J. G. de Blok, F. Bigiel, M. D. Thornley: Dust and atomic gas in dwarf irregular galaxies of the M81 group: the SINGS and THINGS view. *The Astrophysical Journal* 661, 102-114 (2007)
- Wang, R., C. Carilli, A. Beelen, F. Bertoldi, X. Fan, F. Walter, K. M. Menten, A. Omont, P. Cox, M. A. Strauss, L. Jiang: Millimeter and radio observations of $z \sim 6$ quasars. *The Astronomical Journal* 134, 617-627 (2007)
- Wang, Y., X. Yang, H. J. Mo, F. C. van den Bosch: The cross-correlation between galaxies of different luminosities and colors. *The Astrophysical Journal* 664, 608-632 (2007)
- Weiß, A., D. Downes, R. Neri, F. Walter, C. Henkel, D. J. Wilner, J. Wagg, T. Wiklind: Highly-excited CO emission in APM 08279 + 5255 at $z = 3.9$. *Astronomy and Astrophysics* 467, 955-969 (2007)
- Weldrake, D. T. F., P. D. Sackett, T. J. Bridges: A Deep Wide-Field Variable Star Catalog of ω Centauri. *The Astronomical Journal* 133, 1447-1469 (2007)
- Wild, V., G. Kauffmann, T. Heckman, S. Charlot, G. Lemson, J. Brinchmann, T. Reichard, A. Pasquali: Bursty stellar populations and obscured active galactic nuclei in galaxy bulges. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 381, 543-572 (2007)
- Willott, C. J., A. Martínez-Sansigre, S. Rawlings: Molecular gas observations of the reddened quasar 3C 318. *The Astronomical Journal* 133, 564-567 (2007)
- Wolf, C., M. E. Gray, A. Aragón-Salamanca, K. P. Lane, K. Meisenheimer: Morphology-dependent trends of galaxy age with environment in A 901/2 seen with COMBO-17. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 376, L1-L5 (2007)
- Wolf, S., A. Moro-Martín, G. D'Angelo: Signatures of planets in protoplanetary and debris disks. *Planetary and Space Science* 55, 569-581 (2007)
- Wuyts, S., I. Labbé, M. Franx, G. Rudnick, P. G. van Dokkum, G. G. Fazio, N. M. Förster Schreiber, J. Huang, A. F. M. Moorwood, H.-W. Rix, H. Röttgering, P. van der Werf: What do we learn from IRAC observations of galaxies at $2 < z < 3.5$? *The Astrophysical Journal* 655, 51-65 (2007)
- Xu, C., N. Pirzkal, S. Malhotra, J. E. Rhoads, B. Mobasher, E. Daddi, C. Gronwall, N. P. Hathi, N. Panagia, H. C. Ferguson, A. M. Koekemoer, M. Kümmel, L. A. Moustakas, A. Pasquali, S. di Serego Alighieri, J. Vernet, J. R. Walsh, R. Windhorst, H. Yan: Redshifts of emission-line objects in the HUBBLE Ultra Deep Field. *The Astronomical Journal* 134, 169-178 (2007)
- Yang, X., H. J. Mo, F. C. van den Bosch, A. Pasquali, C. Li, M. Barden: Galaxy groups in the SDSS DR4. I. The catalog and basic properties. *The Astrophysical Journal* 671, 153-170 (2007)
- Youdin, A., A. Johansen: Protoplanetary disk turbulence driven by the streaming instability: linear evolution and numerical methods. *The Astrophysical Journal* 662, 613-626 (2007)
- Younger, J. D., G. G. Fazio, J.-S. Huang, M. S. Yun, G. W. Wilson, M. L. N. Ashby, M. A. Gurwell, K. Lai, A. B. Peck, G. R. Petitpas, D. J. Wilner, D. Iono, K. Kohno, R. Kawabe, D. H. Hughes, I. Aretxaga, T. Webb, A. Martínez-Sansigre, S. Kim, K. S. Scott, J. Austermann, T. Perera, J. D. Lowenthal, E. Schinnerer, V. Smolcic: Evidence for a population of high-redshift submillimeter galaxies from interferometric imaging. *The Astrophysical Journal* 671, 1531-1537 (2007)
- Zapatero Osorio, M. R., J. A. Caballero, V. J. S. Béjar, R. Rebolo, D. Barrado Y Navascués, G. Bihain, J. Eislöffel, E. L. Martín, C. A. L. Bailer-Jones, R. Mundt, T. Forveille, H. Bouy: Discs of planetary-mass objects

- in s Orionis. *Astronomy and Astrophysics* 472, L9-L12 (2007)
- Zatloukal, M., H. J. Röser, C. Wolf, H. Hippelein, S. Falter: Distant galaxy clusters in the COSMOS field found by HIROCS. *Astronomy and Astrophysics* 474, L5-L8 (2007)
- Zhang, Q., T. R. Hunter, H. Beuther, T. K. Sridharan, S. Y. Liu, Y. N. Su, H. R. Chen, Y. Chen: Multiple jets from the high-mass (proto)stellar cluster AFGL 5142. *The Astrophysical Journal* 658, 1152-1163 (2007)
- Zhang, Q., T. K. Sridharan, T. R. Hunter, Y. Chen, H. Beuther, F. Wyrowski: A jet-like outflow toward the high-mass (proto)stellar object IRAS 18566 + 0408. *Astronomy and Astrophysics* 470, 269-279 (2007)
- Zheng, X. Z., E. F. Bell, C. Papovich, C. Wolf, K. Meisenheimer, H.-W. Rix, G. H. Rieke, R. Somerville: The dependence of star formation on galaxy stellar mass. *The Astrophysical Journal* 661, L41-L44 (2007)
- Zheng, X. Z., H. Dole, E. F. Bell, E. Le Floch, G. H. Rieke, H.-W. Rix, D. Schiminovich: Infrared spectral energy distributions of $z \sim 0.7$ star-forming galaxies. *The Astrophysical Journal* 670, 301-312 (2007)
- Zirm, A. W., A. van der Wel, M. Franx, I. Labbé, I. Trujillo, P. van Dokkum, S. Toft, E. Daddi, G. Rudnick, H. W. Rix, H. J. A. Röttgering, P. van der Werf: NICMOS imaging of DRGs in the HDF-S: a relation between star formation and size at $z \sim 2.5$. *The Astrophysical Journal* 656, 66-72 (2007)
- Zucker, D. B., A. Y. Kniazev, D. Martínez-Delgado, E. F. Bell, H.-W. Rix, E. K. Grebel, J. A. Holtzman, R. A. M. Walterbos, C. M. Rockosi, D. G. York, J. C. Barentine, H. Brewington, J. Brinkmann, M. Harvanek, S. J. Kleinman, J. Krzesinski, D. Long, E. H. Neilsen, Jr., A. Nitta, S. A. Snedden: Andromeda X, a new dwarf spheroidal satellite of M 31: photometry. *The Astrophysical Journal* 659, L21-L24 (2007)

In Tagungsberichten und Sammelbänden

- Afonso, C., T. Henning: The Pan-Planets project. In: *Transiting Extrasolar Planets Workshop*, (Eds.) Afonso, C., D. Weldrake, T. Henning. ASP Conf. Ser. 366, ASP, 326-331 (2007)
- Arribas, S., P. Ferruit, P. Jakobsen, T. Boeker, A. Bunker, S. Charlot, D. Crampton, M. Franx, M. Garcia-Marin, R. Maiolino, G. de Marchi, H. Moseley, B. Rauscher, M. Regan, H. W. Rix, J. Valenti: The Integral Field Unit of the Near Infrared Spectrophotometer for JWST. In: *Science Perspectives for 3D Spectroscopy*, ESO astrophysics symposia, (Eds.) Kissler-Patig, M., J. R. Walsh, M. M. Roth. Springer, Berlin 2007, 21. – 26
- Bagetakos, I., E. Brinks, F. Walter, E. de Blok: Fine-scale structure of the neutral ISM in M81. In: *Triggered Star Formation in a Turbulent Interstellar Medium*, (Eds.) Elmegreen, B. G., J. Palous. IAU Symposium 237, Cambridge Univ. Press, 394-394 (2007)
- Bagetakos, I., E. Brinks, F. Walter, E. de Blok: An inventory of supershells in nearby galaxies: first results from THINGS. In: *Triggered Star Formation in a Turbulent Interstellar Medium*, (Eds.) Elmegreen, B. G., J. Palous. IAU Symposium 237, Cambridge Univ. Press, 393-393 (2007)
- Beers, T. C., Y. Lee, T. Sivarani, C. Allende Prieto, R. Wilhelm, P. R. Fiorentin, C. Bailer-Jones, J. E. Norris, S. C. Team: The SDSS-I Value-Added Catalog of stellar parameters and the SEGUE pipeline. *Memorie della Societa Astronomica Italiana* 77, 1171 (2006)
- Bell, E. F., M. Barden, X. Zheng, C. Papovich, E. Le Floch, G. Rieke, C. Wolf: Eight billion years of disk galaxy evolution. In: *Island Universes – Structure and Evolution of Disk Galaxies*, Astrophysics and Space Science Proceedings, (Ed.) de Jong, R. S. Springer, 2007, 475-480
- Bigiel, F., F. Walter, E. de Blok, E. Brinks, B. Madore: Star formation thresholds derived from THINGS. In: *Triggered Star Formation in a Turbulent Interstellar Medium*, (Eds.) Elmegreen, B. G., J. Palous. IAU Symposium 237, Cambridge University Pr., 397-397 (2007)
- Böker, T., J. Falcon-Barroso, J. H. Knapen, E. Schinnerer, E. Allard, S. Ryder: A SINFONI view of the nuclear star formation ring in NGC 613. In: *Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies*, (Eds.) Vazdekis, A., R. F. Peletier. IAU Symposium 241, Cambridge Univ. Press, 497-498 (2007)
- Böker, T., E. Schinnerer, E. Emsellem, U. Lisenfeld: Feeding the Nuclear Starburst in NGC 6946. In: *Island Universes – Structure and Evolution of Disk Galaxies*, Astrophysics and Space Science Proceedings, (Ed.) de Jong, R. S. Springer, 2007, 117-120
- Boss, A. P., R. P. Butler, W. B. Hubbard, P. A. Ianna, M. Kürster, J. J. Lissauer, M. Mayor, K. J. Meech, F. Mignard, A. J. Penny, A. Quirrenbach, J. C. Tarter, A. Vidal-Madjar: Working Group on Extrasolar Planets. In: *Reports on Astronomy 2002–2005*, (Ed.) Engvold, O. IAU Transactions 26A, Cambridge Univ. Press, 183-186 (2007)
- Bowdley, D., F. Hormuth, K. Sonnenberg, M. Endriss, L. Kurtze, F. Lewis, M. Beer, T. Brown: Minor Planet Observations [F65 Haleakala-Faulkes Telescope North]. *Minor Planet Circulars* 5987, (2007)
- Briegel, F., J. Berwein, F. Kittmann, W. Gässler: Logging and exception management for SOA-based composite applications. In: *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI*, (Eds.) Shaw, R. A., F. Hill, D. J. Bell. ASP Conf. Ser. 376, ASP, 377-380 (2007)
- Brinks, E., I. Bagetakos, F. Walter, E. de Blok: Observations of supershells in the interstellar medium of nearby gala-

- xies. In: *Triggered Star Formation in a Turbulent ISM*, (Eds.) Elmegreen, B. G., J. Palous. IAU Symposium 237, Cambridge University Pr., 76-83 (2007)
- Busch, M., F. Hormuth, S. Honig: *Minor Planet Observations [611 Starkenburg]*. *Minor Planet Circulars* 5931, (2007)
- Byström, J., N. Ryde, S. Feltzing, J. Holmberg, T. Bensby: The determination of stellar parameters of giants in the galactic disks and bulge. In: *Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies*, (Eds.) Vazdekis, A., R. Peletier. IAU Symposium 241, Cambridge Univ. Press, 235-236 (2007)
- Corbally, C., S. Giridhar, C. Bailer-Jones, R. Humphreys, D. Kirkpatrick, T. L. Evans, X. Luri, D. Minniti, L. Pasinetti, V. Straizys, W. Weiss: Commission 45: stellar classification. In: *Reports on Astronomy 2003-2005* (Ed.) Engvold, O. IAU Transactions 26, Cambridge Univ. Press, 221-231 (2007)
- Corbally, C. J., C. A. L. Bailer-Jones, S. Giridhar, T. H. Lloyd Evans: Joint discussion 13 exploiting large surveys for Galactic astronomy. In: *Highlights of Astronomy*, (Ed.) van der Hucht, K. *Highlights of Astronomy* 14, Cambridge Univ. Press, 395-419 (2007)
- de Jong, J. T. A., D. J. Butler, H. W. Rix, A. E. Dolphin, D. Martínez-Delgado: Studying Milky Way structure using stellar populations. In: *Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies*, (Eds.) Vazdekis, A., R. F. Peletier. IAU Symposium 241, Cambridge Univ. Press, 213-217 (2007)
- de Jong, R. S., E. F. Bell: Comparing dynamical and stellar population mass-to-light ratio estimates. In: *Island Universes – Structure and Evolution of Disk Galaxies, Astrophysics and Space Science Proceedings*, (Ed.) De Jong, R. S. Springer, 2007, 107-115
- de Jong, R. S., A. C. Seth, E. F. Bell, T. M. Brown, J. S. Bullock, S. Courteau, J. J. Dalcanton, H. C. Ferguson, P. Goudfrooij, S. Holfeltz, C. Purcell, D. Radburn-Smith, D. Zucker: GHOSTS: the resolved stellar outskirts of massive disk galaxies. In: *Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies*, (Eds.) Vazdekis, A., R. Peletier. IAU Symposium 241, Cambridge Univ. Press, 503-504 (2007)
- Franco, I., K. Meisenheimer, C. Wolf, E. Bell, M. H. Nicol, C. Tapken: New spectral templates of galaxies for multi color classification. In: *Galaxy Evolution across the HUBBLE Time*, (Eds.) Combes, F., J. Palous. IAU Symposium 235, Cambridge Univ. Press, 97-97 (2007)
- Gaessler, W., T. M. Herbst, R. Ragazzoni, A. Eckart, G. Weigelt: Fizeau interferometry with the LBT astronomy on the way to ELTs. In: *Exploring the Cosmic Frontier, ESO Astrophysics Symposia*, (Eds.) Lobanov, A. P., J. A. Zensus, C. Cesarsky, P. Diamond. Springer, 2007, 55-56
- Gallazzi, A., J. Brinchmann, S. Charlot, S. D. M. White: A census of the physical parameters of nearby galaxies. In: *Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies*, (Eds.) Vazdekis, A., R. F. Peletier. IAU Symposium 241, Cambridge Univ. Press, 556-560 (2007)
- Grosbøl, P., H. Dottori, R. Gredel: Young stellar clusters triggered by a density wave in NGC 2997. In: *Triggered Star Formation in a Turbulent Interstellar Medium*, (Eds.) Elmegreen, B. G., J. Palous. IAU Symposium 237, Cambridge Univ. Press, 417-417 (2007)
- Haan, S., E. Schinnerer, C. G. Mundell, S. García-Burillo, F. Combes: Gas dynamics in AGN galaxies: first results of the HI-NUGA survey. In: *Galaxy Evolution Across the HUBBLE Time*, (Eds.) Combes, F., J. Palous. IAU Symposium 235, Cambridge Univ. Press, 101-101 (2007)
- Häußler, B., E. F. Bell, M. Barden, D. H. McIntosh, H.-W. Rix, A. Borch, S. V. W. Beckwith, J. A. R. Caldwell, C. Heymans, K. Jahnke, S. Jogee, S. E. Koposov, K. Meisenheimer, C. Y. Peng, S. F. Sánchez, R. S. Somerville, L. Wisotzki, C. Wolf: GEMS: the destiny of blue spheroidal galaxies. In: *Galaxy Evolution Across the HUBBLE Time*, (Eds.) Combes, F., J. Palous. IAU Symposium 235, Cambridge Univ. Press, 102-102 (2007)
- Hennemann, M., S. M. Birkmann, O. Krause, D. Lemke: A (Sub)Millimeter survey of massive star-forming regions identified by the ISOPHOT Serendipity Survey (ISOSS). In: *Triggered Star Formation in a Turbulent ISM*, (Eds.) Elmegreen, B. G., J. Palous. IAU Symposium 237, Cambridge Univ. Press, 424-424 (2007)
- Hormuth, F.: *Minor Planet Observations*. *Minor Planet Circulars* 5958, (2007)
- Hormuth, F.: *Comet Observations* *Minor Planet Circulars* 5955, (2007)
- Impey, C. D., J. R. Trump, P. J. McCarthy, M. Elvis, J. P. Huchra, N. Z. Scoville, S. J. Lilly, M. Brusa, G. Hasinger, E. Schinnerer, P. Capak, J. Gabor: A survey of AGN and supermassive black holes in the COSMOS survey. In: *Black Holes from Stars to Galaxies*, (Eds.) Karas, V., G. Matt. IAU Symposium 238, Cambridge Univ. Press, 287-290 (2007)
- Ivezic, Z., J. A. Smith, G. Miknaitis, H. Lin, D. L. Tucker, R. Lupton, G. R. Knapp, J. E. Gunn, M. Strauss, J. Holtzman, S. Kent, B. Yanny, D. Schlegel, D. Finkbeiner, N. Padmanabhan, C. Rockosi, M. Juric, N. Bond, B. Lee, S. Jester, H. Harris, P. Harding, J. Brinkmann, D. York: A Comparison of SDSS Standard Star Catalog for Stripe 82 with Stetson's Photometric Standards. In: *The Future of Photometric, Spectrophotometric, and Polarimetric Standardization*, (Ed.) Sterken, C. ASP Conf. Ser. 364, ASP, 165-175 (2007)
- Jaffe, W., D. Raban, H. Röttgering, K. Meisenheimer, K. Tristram: Mid-infrared interferometric observations of AGNs. In: *The Central Engine of Active Galactic Nuclei*, (Eds.) Ho, L. C., J.-M. Wang. ASP Conf. Ser. 373, ASP, 439-442 (2007)
- Kendrew, S., B. Brandl, R. Lenzen, L. Venema, H. U. Käufel, G. Finger, A. Glasse, R. Stuik: Mid-infrared instrumentation for the European Extremely Large Telescope. In: *Cryogenic Optical Systems and Instruments XII*, (Eds.) Heaney, J. B., L. G. Burriesci. SPIE 6692, SPIE, 66920B (2007)

- Kittmann, F., W. Gässler, F. Briegel, J. Berwein: LINC-NIRVANA instrument control software. In: *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI* (Eds.) Shaw, R. A., F. Hill, D. J. Bell. ASP Conf. Ser. 376, ASP, 661-664 (2007)
- Kurk, J. D., F. Walter, D. Riechers, H.-W. Rix, S. Wagner, L. Pentericci, X. Fan: Metallicity and black hole masses of $z \sim 6$ quasars. In: *Highlights of Astronomy, Highlights of Astronomy 14*, Cambridge Univ. Press, 257-257 (2007)
- Launhardt, R., T. Henning, D. Queloz, A. Quirrenbach: Towards high-precision astrometry: differential delay lines for PRIMA@VLTI. In: *Exploring the Cosmic Frontier, ESO Astrophysics Symposia* (Eds.) Lobanov, A. P., J. A. Zensus, C. Cesarsky, P. Diamond. Springer, Berlin 2007, 265
- Lemke, D., S. Birkmann, K. Einert, M. Ellenrieder, U. Grözinger, C. Haberstroh, T. Henning, O. Krause: A new test-cryostat for the grating- and filter-wheels of the MIRI- and NIRSPEC-instruments for JWST. In: *3rd European Space Cryogenics Workshop Innovation and Challenges*, (Eds.) Sirbi, A., M. Linder. WP- 277, ESA/ESTEC, Section 7-4 (2007)
- Linz, H., R. Klein, L. Looney, T. Henning, B. Stecklum, L. Å. Nyman: Southern IRDCs seen with SPITZER/MIPS. In: *Triggered Star Formation in a Turbulent ISM*, (Eds.) Elmegreen, B. G., J. Palous. IAU Symposium 237, Cambridge Univ. Press, 440-440 (2007)
- Lombini, M., R. Ragazzoni, C. Arcidiacono, A. Baruffolo, G. Cresci, E. Diolaiti, R. Falomo, W. Gaessler, F. Mannucci, E. Vernet, J. Vernet, M. Xompero: Layer-Oriented MCAO projects for 8-m class telescopes and possible scientific outcome. In: *Exploring the Cosmic Frontier, ESO Astrophysics Symposia* (Eds.) Lobanov, A. P., J. A. Zensus, C. Cesarsky, P. Diamond. Springer, Berlin 2007, 59-60
- Martin, N. F., R. A. Ibata, M. J. Irwin: A panoramic view of the Southern quadrant of the Andromeda galaxy outer halo. In: *Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies*, (Eds.) Vazdekis, A., R. F. Peletier. IAU Symposium 241, Cambridge Univ. Press, 357-358 (2007)
- Martinez-Sansigre, A., S. Rawlings: High-redshift obscured quasars. In: *The Central Engine of Active Galactic Nuclei*, (Eds.) Ho, L. C., J.-M. Wang. ASP Conf. Ser. 373, ASP, 728-731 (2007)
- McNaught, R. H., L. Donato, V. Gonano, E. Pettarin, G. Lombardi, L. Bittesini, F. Hormuth, M. Tichy, M. Honkova, J. Ticha, P. Birtwhistle: Comet C/2007 T1 (McNaught). *International Astronomical Union Circular* 8877, 1 (2007)
- Mo, H. J., X. H. Yang, F. C. van den Bosch, Y. P. Jing, S. M. Weinmann: Establishing the relationship between galaxies and dark matter. In: *Galaxy Evolution Across the HUBBLE Time*, (Eds.) Combes, F., J. Palous. IAU Symposium 235, Cambridge Univ. Press, 43-47 (2007)
- Nordström, B., J. Andersen, J. Holmberg: Evolution of the galactic disk from a local sample. In: *Galaxy Evolution Across the HUBBLE Time*, (Eds.) Combes, F., J. Palous. IAU Symposium 235, Cambridge Univ. Press, 126-126 (2007)
- Pakstiene, E., J. E. Solheim, G. Handler, B. Steininger, F. Rodler, M. Paparo, Z. Bognar, R. Patterson, M. Reed: Monitoring of the cool ZZ Ceti star PG 2303+243. In: *Convection in Astrophysics*, (Eds.) Kupka, F., I. Roxburgh, K. Lam Chan. IAU Symposium 239, Cambridge Univ. Press, 382-384 (2007)
- Pavlov, A., J. Berwein, W. Gässler, F. Briegel: Observation preparation and support software for LINC-NIRVANA. In: *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI* (Eds.) Shaw, R. A., F. Hill, D. J. Bell. ASP Conf. Ser. 376, ASP, 665-668 (2007)
- Prieto, M. A., J. Reunanen, T. Beckert, K. Tristram, N. Neumayer, J. A. Fernandez, J. Acosta: The spectral energy distribution of the central parsecs region of galaxies. In: *The Central Engine of Active Galactic Nuclei*, (Eds.) Ho, C. L., J.-M. Wang. ASP Conf. Ser. 373, ASP, 600-603 (2007)
- Riechers, D. A., F. Walter, C. L. Carilli, K. K. Knudsen, K. Y. Lo, D. J. Benford, J. G. Staguhn, T. R. Hunter, F. Bertoldi, C. Henkel, K. M. Menten, A. Weiss, M. S. Yun, N. Z. Scoville: Detecting low-order CO emission from $z > 4$ quasar host galaxies. In: *Galaxy Evolution Across the HUBBLE Time*, (Eds.) Combes, F., J. Palous. IAU Symposium 235, Cambridge University Pr., 423-423 (2007)
- Riechers, D. A., F. Walter, C. L. Carilli, K. K. Knudsen, K. Y. Lo, D. J. Benford, J. G. Staguhn, T. R. Hunter, F. Bertoldi, C. Henkel, K. M. Menten, A. Weiss, M. S. Yun, N. Z. Scoville: CO(1-0) emission from quasar host galaxies beyond redshift 4. In: *From Z-Machines to ALMA: (Sub)Millimeter Spectroscopy of Galaxies* (Eds.) Baker, A. J., J. Glenn, A. I. Harris, J. G. Mangum, M. S. Yun. ASP Conf. Ser. 375, ASP, 148-156 (2007)
- Rossa, J., P. R. van der Mare, T. Böker, J. Gerssen, C. L. Ho, H.-W. Rix, C. J. Shields, C.-J. Walcher: HST / STIS results on nuclear star clusters in spiral galaxies. In: *Island Universes – Structure and Evolution of Disk Galaxies, Astrophysics and Space Science Proceedings*, (Ed.) de Jong, R. S. Springer, 2007, 449-452
- Rothberg, B., R. Somerville, B. Whitmore, W. Harris: A semi-analytic approach to understanding the bimodality of GCs in the Milky Way & M31. In: *Galaxy Evolution Across the HUBBLE Time*, (Eds.) Combes, F., J. Palous. IAU Symposium 235, Cambridge Univ. Press, 132-132 (2007)
- Sabbi, E., A. Nota, M. Sirianni, L. R. Carlson, M. Tosi, J. Gallagher, M. Meixner, M. S. Oey, A. Pasquali, L. J. Smith, M. Vlahic, L. Hawks: Star formation in the Small Magellanic Cloud: the youngest star clusters. In: *Triggered Star Formation in a Turbulent ISM*, (Eds.) Elmegreen, B. G., J. Palous. IAU Symposium 237, Cambridge Univ. Press, 199-203 (2007)
- Schinnerer, E., F. Bertoldi, C. L. Carilli, V. Smolcic, N. Z. Scoville, K. Menten, H. Voss, A. Blain, D. Lutz: Radio and millimeter observations of the COSMOS field. In: *From Z-Machines to ALMA: (Sub)Millimeter*

- Spectroscopy of Galaxies, (Eds.) Baker, A. J., J. Glenn, A. I. Harris, J. G. Mangum, M. S. Yun. ASP Conf. Ser. 375, ASP, 123-129 (2007)
- Schwartz, M., J. C. Merlin, M. Ory, T. Brown, M. Hidas, F. Hormuth, L. Kurtze: Minor Planet Observations [926 Tenagra II Observatory]. *Minor Planet Circulars* 5986, (2007)
- Skillman, E. D., J. M. Cannon, A. E. Dolphin, R. C. Kennicutt, J. C. Lee, F. Walter, D. R. Weisz: The recent star formation histories of nearby galaxies. In: *Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies*, (Eds.) Vazdekis, A., R. Peletier. IAU Symposium 241, Cambridge Univ. Press, 286-289 (2007)
- Smolcic, V., E. Schinnerer, M. Scodreggio, C. L. Carilli, P. Franzetti, K. Jahnke: Obtaining the (dust-obscured) star formation history using the VLA-COSMOS survey. In: *Galaxy Evolution Across the HUBBLE Time*, (Eds.) Combes, F., J. Palous. IAU Symposium 235, Cambridge Univ. Press, 428-428 (2007)
- Stegmaier, J. M., S. M. Birkmann, U. Grözinger, N. Haegel, D. Lemke, O. Krause: Transients in stressed Ge: Ga photoconductors under high background for PACS. In: *Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation XV*, (Ed.) Strojnik-Scholl, M. SPIE 6678, SPIE, 667808 (2007)
- Surdej, J., A. Chelli, P. Garcia, T. Henning, A. Quirrenbach: The European Interferometry Initiative (EII) within OPTICON. In: *1st ARENA Conference on Large Astronomical Infrastructures at CONCORDIA, prospects and constraints for Antarctic Optical/IR Astronomy*, (Eds.) Epchtein, N., M. Candidi. EAS Publications Series 25, EdP Sciences, 301-308 (2007)
- Swain, M.: Modeling results and implications for astronomy at Dome C. In: *1st ARENA Conference on "Large Astronomical Infrastructures at CONCORDIA, prospects and constraints for Antarctic Optical/IR Astronomy"*, (Eds.) Epchtein, N., M. Candidi. EAS Publications Series 25, EDP Sciences, 43-48 (2007)
- Tezcan, D. S., J. Putzeys, K. De Munck, T. Souverijns, P. Merken, P. Fiorini, C. Van Hoof, T. Dartois, C. Israbian, S. M. Birkmann, J. Stegmaier, U. Grözinger, O. Krause, P. De Moor: Development of a Si:As blocked impurity band detector for far IR detection. In: *Infrared Systems and Photoelectronic Technology II*, (Eds.) Longshore, R., A. Sood, J. Dereniak. 6660, SPIE, 66600R (2007)
- Tristram, K. R. W., K. Meisenheimer, W. Jaffe, W. D. Cotton: Mapping the circumnuclear dust in nearby AGN with MIDI. In: *Black Holes from Stars to Galaxies* (Eds.) Karas, V., G. Matt. IAU Symposium 238, Cambridge Univ. Press, 93-98 (2007)
- Trujillo, I., N. M. Förster Schreiber, G. Rudnick, M. Barden, M. Franx, H.-W. Rix, J. A. R. Caldwell, D. H. McIntosh, A. Zirm, B. Häußler, P. G. van Dokkum, I. Labbé, A. Moorwood, H. Röttgering, A. van der Wel, P. van der Werf, L. van Starckenburg: Size Evolution of Galaxies Since $z \sim 3$: COMBINING SDSS, GEMS and FIRES. In: *Island Universes – Structure and Evolution of Disk Galaxies, Astrophysics and Space Science*, (Ed.) De Jong, R. S. Springer, 2007, 481-486
- Trump, J. R., C. D. Impey, J. M. Gabor, P. J. McCarthy, M. Elvis, J. Huchra, M. Brusa, G. Hasinger, E. Schinnerer, N. Scoville: A multiwavelength study of AGN with COSMOS: do Low-Eddington Ratio Type 1 AGN exist? In: *The Central Engine of Active Galactic Nuclei*, (Eds.) Ho, C. L., J.-M. Wang. ASP Conf. Ser. 373, ASP, 726-727 (2007)
- van der Marel, R. P., J. Rossa, C. J. Walcher, T. Boeker, L. C. Ho, H.-W. Rix, J. C. Shields: Nuclear star clusters (nuclei) in spiral galaxies and connection to supermassive black holes. In: *Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies*, (Eds.) Vazdekis, A., R. Peletier. IAU Symposium 241, Cambridge Univ. Press, 475-478 (2007)
- Walter, F.: First galaxies and AGNs. In: *Galaxy Evolution Across the HUBBLE Time*, (Eds.) Combes, F., J. Palous. IAU Symposium 235, Cambridge Univ. Press, 358-361 (2007)
- Walter, F., D. A. Riechers, C. L. Carilli, F. Bertoldi, A. Weiss, P. Cox: High-Resolution CO Imaging of High-Redshift QSO Host Galaxies. In: *From Z-Machines to ALMA: (Sub)Millimeter Spectroscopy of Galaxies*, (Eds.) Baker, A. J., J. Glenn, A. I. Harris, J. G. Mangum, M. S. Yun. ASP Conf. Ser. 375, ASP, 182-190 (2007)
- Weiss, A., D. Downes, F. Walter, C. Henkel: CO line SEDs of high-redshift QSOs and submm galaxies. In: *From Z-Machines to ALMA: (Sub)Millimeter Spectroscopy of Galaxies*, (Eds.) Baker, A. J., J. Glenn, A. I. Harris, J. G. Mangum, M. S. Yun. ASP Conf. Ser. 375, ASP, 25-33 (2007)
- Weldrake, D., D. D. R. Bayliss, P. D. Sackett, M. Bessell, B. Tingley: Searching for planetary transits in the Lupus Galactic plane. In: *Transiting Extrasolar Planets Workshop*, (Eds.) Afonso, C., D. Weldrake, T. Henning. ASP Conf. Ser. 366, ASP, 289-294 (2007)
- Weldrake, D. T. F., J. Setiawan, P. Weise, T. Henning: Radial velocity follow-up of planetary transit candidate MACHO.120.22303.5389. In: *Transiting Extrasolar Planets Workshop*, (Eds.) Afonso, C., D. Weldrake, T. Henning. ASP Conf. Ser. 366, ASP, 265-267 (2007)

Eingeladene Vorträge und Reviews

- Arce, H. G., D. Shepherd, F. Gueth, C. F. Lee, R. Bachiller, A. Rosen, H. Beuther: Molecular outflows in low- and high-mass star-forming regions. In: *Protostars and Planets V*, The University of Arizona space science series, (Eds.) Reipurth, B., J. Jewitt, K. Keil. Univ. of Arizona Press, Tucson 2007, 245-260
- Beuther, H.: Physics and chemistry of hot molecular cores. In: *Triggered Star Formation in a Turbulent ISM*, (Eds.) Elmegreen, B. G., J. Palous. IAU Symposium 237, Cambridge Univ. Press, 148-154 (2007)
- Beuther, H., E. B. Churchwell, C. F. McKee, J. C. Tan: The formation of massive stars. In: *Protostars and Planets V*, The University of Arizona space science series, (Eds.) Reipurth, B., J. Jewitt, K. Keil. Univ. of Arizona Press, Tucson 2007, 165-180
- Dullemond, C. P., D. Hollenbach, I. Kamp, P. D'Alessio: Models of the structure and evolution of protoplanetary disks. In: *Protostars and Planets V*, (Eds.) Reipurth, B., J. Jewitt, K. Keil. Univ. of Arizona Pr., Tucson 2007, 555-572
- Feldt, M., R. Gratton, S. Hippler, H. M. Schmid, M. Turatto, R. Waters, T. Henning: The CHEOPS Project: characterizing exoplanets by opto-infrared polarimetry and spectroscopy. In: *Exploring the Cosmic Frontier*, ESO Astrophysics Symposia, (Eds.) Lobanov, A. P., J. A. Zensus, C. Cesarsky, P. Diamond. Springer, Berlin 2007, 261-264
- Fendt, C.: MHD simulations of star-disk magnetospheres and the formation of outflows and jets. In: *Star-Disk Interaction in Young Stars*, (Eds.) Bouvier, J., I. Appenzeller. IAU Symposium 243, Cambridge Univ. Press, 265-276 (2007)
- Güdel, M.: The sun in time: activity and environment. *Living Reviews in Solar Physics* 4, (2007)
- Herbst, W., J. Eislöffel, R. Mundt, A. Scholz: The rotation of young low-mass stars and brown dwarfs. In: *Protostars and Planets V*, The University of Arizona space science series, (Eds.) Reipurth, B., J. Jewitt, K. Keil. Univ. of Arizona Press, Tucson 2007, 297-311
- Klahr, H.: Thermal convection in accretion disks. In: *Convection in Astrophysics*, (Eds.) Kupka, F., I. Roxburgh, K. Chan. IAU Symposium 239, Cambridge University Pr., 405-416 (2007)
- Luhman, K. L., V. Joergens, C. Lada, J. Muzerolle, I. Pascucci, R. White: The formation of brown dwarfs: observations. In: *Protostars and Planets V*, The University of Arizona space science series, (Eds.) Reipurth, B., J. Jewitt, K. Keil. Univ. of Arizona Press, Tucson 2007, 443-457
- Millan-Gabet, R., F. Malbet, R. Akeson, C. Leinert, J. Monnier, R. Waters: The circumstellar environments of young stars at AU scales. In: *Protostars and Planets V*, The University of Arizona space science series, (Eds.) Reipurth, B., J. Jewitt, K. Keil. Univ. of Arizona Press, Tucson 2007, 539-554
- Natta, A., L. Testi, N. Calvet, T. Henning, R. Waters, D. Wilner: Dust in protoplanetary disks: properties and evolution. In: *Protostars and Planets V*, The University of Arizona space science series, (Eds.) Reipurth, B., J. Jewitt, K. Keil. University of Arizona Pr., Tucson 2007, 767-781
- Pudritz, R. E., R. Ouyed, C. Fendt, A. Brandenburg: Disk winds, jets, and outflows: theoretical and computational foundations. In: *Protostars and Planets V*, The University of Arizona space science series, (Eds.) Reipurth, B., J. Jewitt, K. Keil. Univ. of Arizona Press, Tucson 2007, 277-294

Tagungsberichte und Bücher

- Afonso, C., D. Weldrake, T. Henning (Eds.): *Transiting Extrasolar Planets Workshop*. ASP Conf. Ser. 366. ASP, San Francisco 2007, 342p

Doktorarbeiten

- Birkmann, S.: *Frühe Phasen der massereichen Sternentstehung*. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007
- Carmona, A.: *Observational studies of gas in protoplanetary disks*. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007
- Häußler, B.: *Galaxy evolution in the last 9 billion years*. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007
- Johansen, A.: *Numerical models of the early STAGES of planet formation*. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007
- Neumayer, N.: *The nucleus of Centaurus A*. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007
- Quanz, S. P.: *Circumstellar disks and envelopes around young low-mass stars*. Ruprecht-Karls-Univ. Heidelberg, 2007
- Riechers, D. A.: *The molecular ISM of quasar host galaxies in the early universe*. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007

Schartmann, M.: Models of dust and gas tori in active galactic nuclei. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007

Scheegerer, A.: Struktur- und Staubeentwicklung in zirkumstellaren Scheiben um T Tauri-Sterne. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007

Diplomarbeiten

Hennekemper, E.: The star-forming region NGC 346 in the Small Magellanic Cloud Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007

Hormuth, F.: ASTRALUX: high angular resolution astronomy with an electron multiplying CCD. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007

Rochau, B.: Photometric study of the intermediate-age star cluster BS 90 Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007

Smolcic, V.: The faint radio population in the VLA-COSMOS survey : star forming galaxies and active galactic nuclei. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007

Tristram, K. R. W.: Mid-infrared interferometry of nearby active galactic nuclei. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007

Ruhland, C.: Probing 8 billion years of elliptical galaxy evolution. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007

Schmalzl, M.: The star forming region NGC 602 in the Small Magellanic Cloud. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 2007

Schmidt, J. J.: Design and implementation of a seeing monitor for the Large Binocular Telescope. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007

Weise, P.: Charakterisierung naher junger Sterne. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007

Populärwissenschaftliche Schriften

Blum, J., S. Wolf, H. Klahr: Die Entstehung von Planetensystemen. Themenheft Planeten. Physik in der Schule 56, 1, 22-34 (2007)

Dannerbauer, H.: Dynamik ferner Galaxien. Sterne und Weltraum 46,5, 20 (2007)

De Jong, J. K.: Een dozijn nieuwe dwergen. Zenit 2007,11, 488-492 (2007)

Falcón-Barroso, J., T. Böker, E. Schinnerer, J. H. Knapen, S. Ryder: Star-forming nuclear rings in spiral galaxies. The Messenger 130, 40-42 (2007)

Hennekemper, E.: Entwicklung von M-Sternen. Sterne und Weltraum 46,7, 21-21 (2007)

Jäger, K.: Wissenschaftliche Beobachtungen am LBT gestartet. Sterne und Weltraum 46,7, 16-18 (2007)

Linz, H.: Renaissance der Parallaxenmethode. Sterne und Weltraum 46,6, 22-24 (2007)

Schreiber, J.: »Wo sind die Schwarzen Löcher der Mittelklasse?«. Sterne und Weltraum 46,6, 24-25 (2007)

Siebenmorgen, R., A. Smette, H. Käufl, A. Seifahrt, S. Uttenthaler, A. Bik, M. Casali, S. Hubrig, Y. Jung, F. Kerber, J. Melnick, A. Moorwood, J.-F. Pirard, H. Sana,

E. Valenti, L. Tacconi-Garman, M. Hilker, F. Primas, P. Amado, A. Carmona, E. F. van Dishoeck, C. Foellmi, M. Goto, R. Gredel, E. Günther, B. Gustaffson, D. Kurtz, C. Lidman, H. Linz, F. Martins, K. Menten, C. Moutou, P. Nissen, D. Nürnberger, A. Reiners: Exploring the near-infrared at high spatial and spectral resolution: first results from CRIRES science verification. The Messenger 128, 17-22 (2007)

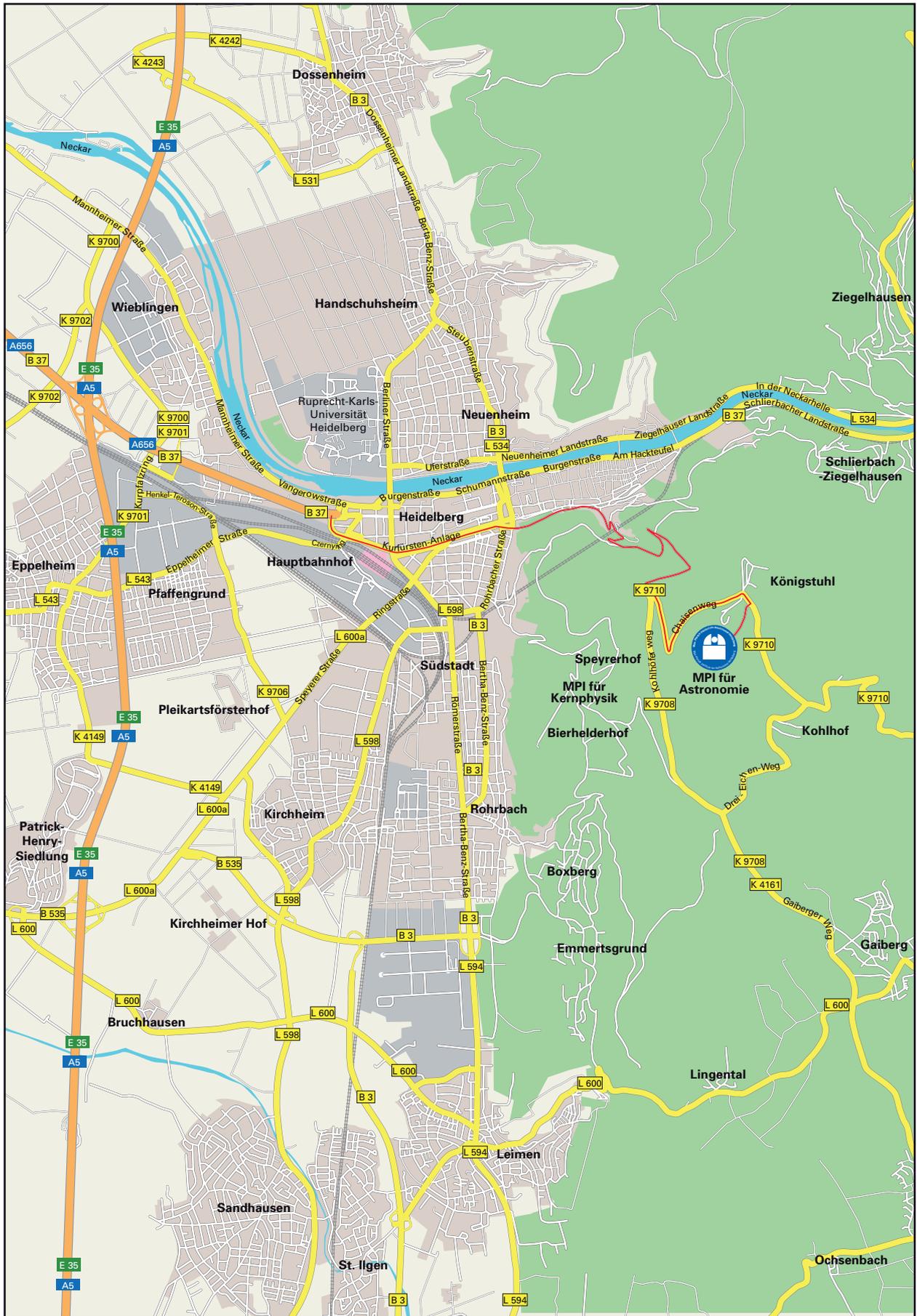
Stegmaier, J.: Kosmischer Kannibalismus: Wenn Riesen Zwerge fressen Sterne und Weltraum 46,1, 22-25 (2007)

Stegmaier, J.: Auf zum Mond! Sterne und Weltraum 46,6, 16-19 (2007)

Stegmaier, J.: Dunkle Materie – Das Gerüst des Universums. Sterne und Weltraum 46,8, 20-23 (2007)

Stegmaier, J.: Akari bringt Licht ins Dunkel. Sterne und Weltraum 46,11, 19-21 (2007)

Tapken, C., I. Appenzeller, A. Gabasch, J. Heidt, U. Hopp, R. Bender, S. Noll, S. Seitz, S. Richling: The puzzle of the Lya Galaxies: new results from the VLT. The Messenger 128, 51-55 (2007)



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 81 Instituten und Einrichtungen erkenntnisorientierte und anwendungsorientierte Grundlagenforschung. Bei einem Jahresetat von rund 1,4 Milliarden Euro im Jahr 2007 beschäftigt sie rund 12 600 Mitarbeiter, von denen etwa 4400 Wissenschaftler sind. Zusätzlich forschen im Jahresverlauf rund 11 300 Nachwuchs- und Gastwissenschaftler an den Einrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft.

Das Ziel der Max-Planck-Gesellschaft ist die Förderung von Spitzenforschung im internationalen Vergleich. Dazu werden die Forschungseinrichtungen angemessen ausgestattet und herausragend qualifizierten Forschern anvertraut. Diese genießen bei ihrer Arbeit ein hohes Maß an wissenschaftlicher Autonomie.

Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.
Referat für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Hofgartenstr. 8
80539 München

Tel.: 089/2108-1275 oder -1277
Fax: 089/2108-1207
Internet: www.mpg.de



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT