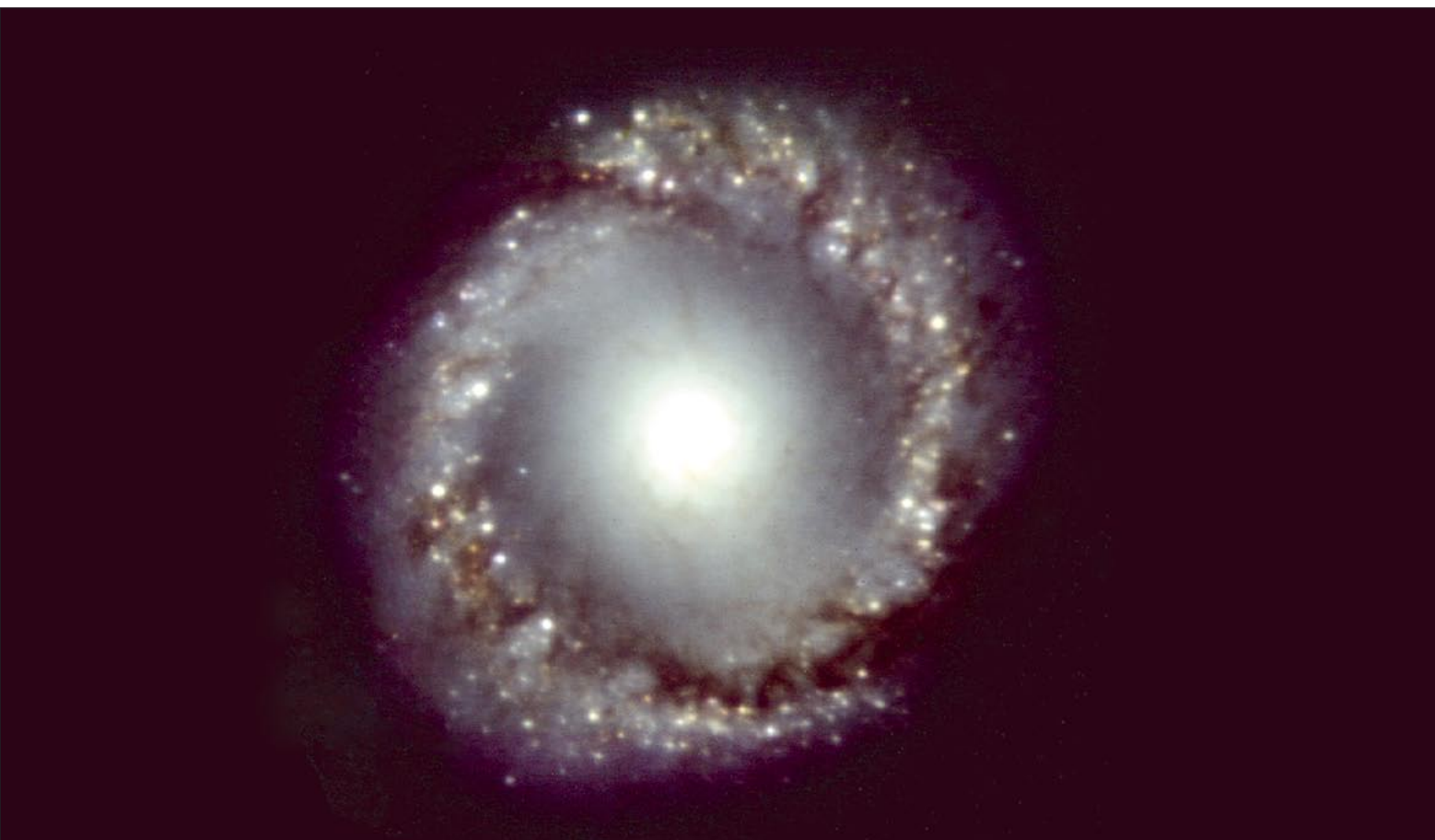


Max-Planck-Institut für Astronomie Heidelberg-Königstuhl



Jahresbericht

2004



Zum Titelbild:

Der aktive Kern der Spiralgalaxie NGC 1097 und seine Umgebung, aufgenommen mit dem hochauflösenden Infrarot-Kamerasystem NACO am VLT. Mehr als 300 Sternentstehungsgebiete (weiße Flecken im Bild) sind in einem Radius von 2000 Lichtjahren um eine helle Zentralquelle verteilt, die den galaktischen Kern markiert. Die Winkelauflösung beträgt 0.14 Bogensekunden. (Beitrag auf S. 61 – 67)

Max-Planck-Institut für Astronomie

Heidelberg-Königstuhl

Jahresbericht

2004



Max-Planck-Institut für Astronomie

Wissenschaftliche Mitglieder, Kollegium, Direktoren:

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

Emeritierte wissenschaftliche Mitglieder:

Prof. Guido Münch

Auswärtige Wissenschaftliche Mitglieder:

Prof. Immo Appenzeller, Heidelberg	Prof. George H. Herbig, Honolulu
Prof. Steven Beckwith, Baltimore	Prof. Rafael Rebolo, Tenerife
Prof. Karl-Heinz Böhm, Seattle	

Fachbeirat:

Prof. Robert Williams, Baltimore (Vorsitz)	
Prof. Ralf-Jürgen Dettmar, Bochum	Prof. Rens Waters, Amsterdam
Prof. Ewine van Dishoeck, Leiden	Prof. Simon D. M. White, Garching
Prof. Pierre Léna, Meudon	Prof. Lodewijk Woltjer, Saint-Michel-l'Observatoire
Prof. Dieter Reimers, Hamburg	Prof. Harold Yorke, Pasadena
Prof. Anneila Sargent, Pasadena	

Kuratorium:

Min. Dir. Hermann-Friedrich Wagner, Bonn (Vorsitz)	
Dr. Ludwig Baumgarten, Bonn	Min. Dir. Wolfgang Fröhlich, Stuttgart
Prof. Peter Hommelhoff, Heidelberg	Dipl. Ing. Reiner Klett, München
Dr. Karl A. Lamers, MdB, Berlin	Prof. Roland Sauerbrey, Jena
Dr. h.c. Klaus Tschira, Heidelberg	Ranga Yogeshwar, Köln

Mitarbeiter:

Gegenwärtig sind 224 Mitarbeiter (einschließlich der Drittmittelbeschäftigten) am Institut tätig, darunter 46 Wissenschaftler, sowie 54 Nachwuchs- und Gastwissenschaftler.

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

Calar-Alto-Observatorium

Anschrift: Centro Astronómico Hispano Alemán,
Calle Jesús Durbán 2/2, E-04004 Almería, Spanien
Telefon: 003450 230 988, 004350 632 500, *Fax:* 003450 632 504
E-mail: „name“@caha.de

Arbeitsgruppe Laborastrophysik, Jena

Anschrift: Institut für Festkörperphysik der Friedrich-Schiller-Universität
Helmholtzweg 3, D-07743 Jena
Telefon: 0049-3641-9-47354, *Fax:* 0049-3641-9-47308
E-mail: friedrich.huiskens@uni-jena.de

Impressum

© 2005 Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg
Herausgeber: Dr. Jakob Staude, Prof. Thomas Henning
Text: Dr. Thomas Bührke u. a., *Bilder:* MPIA u. a.
Graphik, Bildbearbeitung, Layout: Karin Meißner-Dorn, Carmen Müllerthann, Dipl.-Phys. Axel M. Quetz, Martina Weckauf
Druck: Laub GmbH & Co. KG, D-74834 Elztal-Dallau
ISSN 1437-2924; Internet: ISSN 1617-0490

Inhalt

Vorwort	5	IV.5 Differentielle Delaylines für VLTI-PRIMA	94
I. Allgemeines	6	IV.6 Der Wellenfrontsensor PYRAMIR	95
I.1 Wissenschaftliche Zielsetzung	6	IV.7 Erneuerung des Steuersystems am 3.5-m-Teleskop	96
I.2 Observatorien – Teleskope – Instrumente	9	IV.8 PACS – Infrarotkamera und Spektrometer für das Weltraumteleskop HERSCHEL	97
I.3 Nationale und internationale Zusammenarbeit ..	15	IV.9 MIRI und NIRSPEC – Instrumente für das James Webb Space Telescope	99
I.4 Lehre und Öffentlichkeitsarbeit	17	V. Menschen und Ereignisse	102
II. Highlights	18	V.1 Die Einweihung des Large Binocular Telescope	102
II.1 Staubwachstum in protoplanetaren Scheiben .	18	V.2 25 Jahre Calar-Alto-Observatorium	106
II.2 Die Entwicklung protoplanetarer Scheiben – mit dem Weltraumteleskop SPITZER beobachtet	22	V.3 Die European Interferometry Initiative	110
II.3 Rätselhafter Sternenstaub im frühen Universum	26	V.4 Die ersten Emmy-Noether-Gruppen am Institut	111
II.4 Der Monoceros-Gezeitenstrom in unserem Milchstraßensystem	29	V.5 Ringberg-Workshop über die Struktur und Entwicklung des Milchstraßensystems und seiner Umgebung	113
II.5 Staub und Gas im entferntesten Quasar	33	V.6 Ringberg-Workshop »Vom Staubkorn zum Planeten«	115
II.6 Warum sinkt die kosmische Sternentstehungsrate?	36	V.7 Erster Studentenworkshop des MPIA auf der Insel Rügen	118
III. Wissenschaftliche Arbeiten	40	V.8 Ehrungen für Nachwuchswissenschaftler ...	119
III.1 Braune Zwerge – Entstehung, Scheiben, Doppelsysteme und Atmosphären	40	V.9 Venus-Transit über dem Schwetzingen Schloßgarten	121
III.2 Staub im Computer: Numerisches zur Entstehung von Planeten	51	V.10 Erinnerungen an das Institut und an Deutschland. Ein Gespräch mit Steven Beckwith	123
III.3 Näher und näher an die Zentren von Galaxien	61	Personal	126
III.4 Wie wird die Aktivität der galaktischen Zentren gespeist?	68	Arbeitsgruppen	127
IV. Instrumentelle Entwicklungen	79	Zusammenarbeit mit Firmen	128
IV.1 Mehr als Streifen: Das Bildebenen-Interferometer LINC-NIRVANA	79	Lehrveranstaltungen	130
IV.2 LUCIFER I/II	91	Tagungen, Vorträge	130
IV.3 MIDI, das Interferometer für das mittlere Infrarot am VLT	92	Mitarbeit in Gremien	135
IV.4 CHEOPS, ein Instrument zur Abbildung extrasolarer Planeten	93	Weitere Aktivitäten am Institut	136
		Veröffentlichungen	136

Vorwort

Mit diesem Jahresbericht für 2004 möchten wir einen Überblick über die Forschungsarbeiten am Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) geben; er wendet sich sowohl an unsere Fachkollegen in aller Welt als auch an die interessierte Öffentlichkeit.

Schlaglichtartig werden wir auf besonders interessante wissenschaftliche Resultate eingehen. Dabei zeigt sich, welches Entdeckungspotential die beiden am Institut betriebenen Felder der *Stern- und Planetenentstehung* sowie der *Galaxien und Kosmologie* in sich bergen. Nicht zuletzt tragen hierzu neue Instrumente bei, die am Institut gebaut wurden oder zu denen wesentliche Beiträge geliefert werden konnten.

Der Aufbau des Large Binocular Telescope (LBT) auf dem Mt. Graham in Arizona, an dem das Institut beteiligt ist, geht mit großer Intensität voran: Im Jahr 2004 konnten wir nach Einbau des ersten Spiegels seine offizielle Einweihung in Arizona feiern. Gleiches gilt für die Instrumentierung, die wir für dieses Teleskop planen und bauen. Ähnlich erfreulich entwickeln sich die Arbeiten an PACS, dem Instrument für das Weltraumteleskop HERSCHEL und an den Instrumenten für das James Webb Space Telescope, den Nachfolger des Weltraumteleskops HUBBLE.

Zusammen mit unseren Partnern haben wir den Bau der differentiellen »Delay Lines« für das Very Large Telescope Interferometer (VLTI) der Europäischen Südsternwarte (ESO) begonnen, um die instrumentellen Voraussetzungen für eine größere astrometrische Himmelsdurchmusterung zur Suche nach extrasolaren Planeten zu schaffen.

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

Mit unseren Jahresberichten wollen wir aber auch wichtige Ereignisse, die am Institut stattgefunden haben, beleuchten. Gleichzeitig lassen wir Gastwissenschaftler und Mitarbeiter unseres Instituts zu Wort kommen, um ein lebendiges Bild von der Arbeitsatmosphäre am Institut zu zeichnen. Statistische Daten sollen einen Einblick in die Struktur des MPIA sowie in seine Publikationstätigkeit ermöglichen.

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

Thomas Henning, Hans-Walter Rix

Heidelberg, im Mai 2005

I. Allgemeines

I.1 Wissenschaftliche Zielsetzung

Das Max-Planck-Institut für Astronomie (Abb. I.1) widmet sich seit seiner Gründung 1967 der Erforschung des Universums im optischen und infraroten Spektralbereich. Neben der Konzeption, Durchführung, Auswertung und Interpretation von Beobachtungsprogrammen werden am MPIA, meist im Rahmen großer internationaler Kollaborationen, Teleskope und Beobachtungsinstrumente geplant und gebaut.

Zwei Schwerpunkte haben sich in der wissenschaftlichen Forschung am Institut herauskristallisiert: einerseits die Entstehung von Sternen und Planeten, andererseits die beobachtende Kosmologie, insbesondere die Frage nach der Entstehung und Entwicklung von Galaxien. Wenngleich diese beiden Bereiche in Bezug auf die Gegenstände der Forschung voneinander getrennt sind, gibt es doch viele Berührungspunkte. So ist beispielsweise die Sternentstehung im jungen Universum eng mit der Entstehung und Entwicklung der Galaxien verknüpft. Beobachtungen mit den besten verfügbaren Instrumenten einerseits und Computersimulationen der am Institut arbeitenden Theoriegruppen andererseits bilden die Grundlage des wissenschaftlichen Fortschritts.

Entstehung von Sternen und Planeten

Die ersten Phasen der Sternentstehung spielen sich im Inneren dichter Molekülwolken ab und bleiben aufgrund der davor befindlichen Staubteilchen im sichtbaren Licht unseren Blicken verborgen. Infrarotstrahlung vermag jedoch den Staub zu durchdringen, weswegen sich die Frühstadien der Sternentstehung in diesem Wellenlängenbereich bevorzugt studieren lassen. Hier geben auch die kalte Interstellare Materie und die aus ihr laufend neu entstehenden Sterne und Planeten den größten Teil ihrer Strahlung ab. Aus diesem Grunde hat sich der Schwerpunkt astronomischer Beobachtungen am MPIA in der jüngeren Vergangenheit immer mehr vom optischen zum infraroten Spektralbereich verlagert.

Mit ISOPHOT sowie mit Submillimeterteleskopen ließen sich im Innern großer Staubwolken sehr kalte und dichte Gebiete nachweisen – protostellare Kerne, die kurz

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



vor dem Kollaps stehen oder sich bereits zu Sternen zusammenziehen. In einem späteren Stadium bildet sich der zentrale (Proto-)Stern. Er ist von einer Scheibe aus Gas und Staub umgeben, in der Planeten entstehen können, die den neuen Stern umlaufen. Es ist aber auch möglich, dass sich ein Doppel- oder Mehrfachsternsystem bildet. Welche Bedingungen müssen vorliegen, damit sich der eine oder der andere Vorgang abspielt? Dies ist eine der Fragen, auf die die Astronomen des MPIA eine Antwort suchen. Hierfür stehen ihnen beispielsweise das hochauflösende Kamerasystem NACO (NAOS und CONICA) und das Interferometer MIDI für den mittleren Infrarotbereich am VLT, sowie das Weltraumteleskop HUBBLE und das Infrarot-Observatorium SPITZER zur Verfügung.

Neuerdings hat auch die Untersuchung von Braunen Zwergen an Bedeutung gewonnen (Kap. III.1). Dies sind »verhinderte« Sterne, deren Masse zu gering ist, um in ihrem Zentrum den hohen Druck zu erzeugen, bei dem Wasserstoff kontinuierlich zu Helium fusioniert. Von den noch masseärmeren Planeten unterscheiden sie sich dadurch, dass in ihrem Innern anfänglich eine Deuterium-Fusion stattfindet. 1995 wurde der erste Braune Zwerg entdeckt, mittlerweile sind etwas mehr als hundert bekannt.

Viele Fragen stellen sich heute: Wie groß ist die Masse dieser Objekte genau? Wie entstehen Braune Zwerge? Welche Eigenschaften haben sie und wie häufig sind sie? Sind auch sie, ähnlich wie Sterne, anfänglich von einer Scheibe aus Gas und Staub umgeben? Zur Beantwortung dieser Fragen lieferten Wissenschaftler des MPIA jüngst wesentliche Beiträge. So entdeckten sie vor wenigen Jahren frei fliegende (also nicht durch die Schwerkraft an einen Zentralstern gebundene) Objekte mit Massen von einigen Jupitermassen. Diese Entdeckung warf ein neues Licht auf die Entstehung von Sternen und Planeten, und sie wirft die Frage nach der Definition von Sternen, Braunen Zwergen und Planeten auf. Außerdem konnten wesentliche Beiträge zur »Doppelsternnatur« Brauner Zwerge und zur Existenz von Scheiben um diese Objekte geliefert werden.

Zunehmend interessant wird auch die Untersuchung massereicher Sterne. Einerseits sind hier Fragen über deren Entstehung unbeantwortet: Wie unterscheiden sich ihre Frühphasen von denen masseärmerer Sterne? Sind sie ebenfalls von Scheiben umgeben, in denen Planeten entstehen könnten? Massereiche junge Sterne sind heiß, geben energiereiche Strahlung ab, und entwickeln starke Teilchenwinde. Damit beeinflussen sie die Entstehung anderer Sterne in ihrer Umgebung. Auf welche Weise dies geschieht, ist eine weitere wichtige Frage.

Diese Problemstellungen lassen sich am besten in den nahen Sternentstehungsgebieten unseres Milchstraßensystems studieren. Die Beobachtung von Sternentstehungsgebieten in anderen Galaxien bietet die Möglichkeit, andere Fragen anzugehen. Da sich hier die gesamten Galaxien gewissermaßen im Überblick darbieten, lassen sich integrale Eigenschaften der Sternsysteme ableiten,

z. B. kann die jährliche Sternentstehungsrate in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Galaxien bestimmt werden. So lässt sich die Rate in unterschiedlichen Galaxientypen oder in Abhängigkeit von der Umgebung der jeweiligen Galaxie ermitteln. Auch die Frage, wie UV-Strahlung und Teilchenwinde das interstellare Medium und damit die gesamte Morphologie der Galaxien beeinflussen, ist derzeit aktuell.

Ergänzend zu den Beobachtungen betreibt eine kleine in Jena ansässige Gruppe als Außenstelle des Instituts – in enger Kollaboration mit Kollegen der dortigen Universität – Arbeiten zur »Laborastrophysik«. Sie untersucht die spektroskopischen Eigenschaften von Staubteilchen mit Größen im Nano- und Mikrometerbereich sowie von Molekülen in der Gasphase. Die hier unter kontrollierten Bedingungen gewonnen Erkenntnisse sind für die Interpretation der astronomischen Beobachtungen von Bedeutung.

Galaxien und Kosmologie

Galaxien, so wie wir sie im heutigen Universum sehen, sind in der Tat großartige »Welteninseln«, bestehend aus Milliarden von Sternen, aus Gas, Staub und der mysteriösen Dunklen Materie. In ihrem qualitativen Erscheinungsbild und in ihrer Struktur zeigen Galaxien bei Weitem nicht die Vielfalt, die physikalisch möglich erscheint, wie Edwin Hubble schon vor 70 Jahren realisierte. Einerseits umspannen Galaxien als Objektklasse zehn Größenordnungen in ihren stellaren Massen, und die Zahl der neu entstehenden Sterne variiert um die gleiche Spanne; die physischen Größen verschiedener Galaxien variieren immerhin um einen Faktor 100. Während einige Galaxien in ihrem Zentrum kein erkennbares Schwarzes Loch haben, wiegt dieses zentrale Schwarze Loch bei anderen Galaxien mehr als eine Milliarde Sterne. Andererseits haben gerade die Ergebnisse der letzten Jahre und des letzten Jahrzehnts empirisch gezeigt, dass nur ein winziger Bruchteil der möglichen Kombinationen aus den charakteristischen Größen (Masse der Sterne, Alter der Sterne, Größe, zentrales Schwarzes Loch, usw.) tatsächlich im Universum verwirklicht sind. Praktisch alle Größen korrelieren stark mit allen anderen: massereiche Galaxien sind groß; massereiche Galaxien weisen praktisch keine jungen Sterne auf; das zentrale Schwarze Loch enthält einen konstanten Massenbruchteil der zehn Millionen Mal größeren sphärischen Sternverteilung. Während Spiralgalaxien der häufigste Galaxientyp sind, gibt es keine solche Galaxien unter den besonders Massereichen.

Das heißt, 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 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: Erstens, Galaxien stellen die einzig stabilen Konfigurationen dar; zweitens, die realisierten Parameter der Galaxien ergeben sich unmittelbar aus den kosmologischen Anfangsbedingungen; drittens, der Prozess der Galaxienentstehung ist durch verschiedene Rückkopplungsprozesse auf eine bestimmte Zahl von Endstadien ausgerichtet. Es ist klar, dass Galaxienentstehung ein komplexer Prozess ist. Welche dieser drei Mechanismen wann und wo eine Rolle spielen, ist Gegenstand der gegenwärtigen Forschungsbemühungen.

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

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

Die am MPIA eingesetzte Methodik um diese Fragen anzugehen umfasst drei Aspekte: Die detaillierte Untersuchung von 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.

Das MPIA ist mit seinen Beobachtungsmöglichkeiten auf diesem sich schnell entwickelnden Gebiet in der Lage, an vorderster Front auf Neuland unseres Wissens vorzudringen.

I.2 Observatorien – Teleskope – Instrumente

Mit der Gründung des Instituts begannen Planung und Aufbau des Deutsch-Spanischen Astronomischen Zentrums (DSAZ), kurz Calar-Alto-Observatorium (Abb. I.2), auf dem 2168 Meter hohen Berg Calar Alto in der Provinz Almeria, Südspanien. Dort arbeiten drei Teleskope mit 1.2, 2.2 und 3.5 Metern Öffnung. Das Observatorium wurde bis Ende 2003 als Außenstelle des MPIA mit spanischer Beteiligung geführt. Seit dem 1. Januar 2004 wird es paritätisch mit dem spanischen Consejo Superior de Investigaciones Científicas betrieben. Zudem überlässt das MPIA der Europäischen Südsternwarte (ESO) während etwa 75 % der Beobachtungszeit ein 2.2-Meter-Teleskop als Leihgabe. Es steht auf dem Berg La Silla in Chile.

Die am Institut entwickelten und gebauten Instrumente werden sowohl für erdgebundene als auch für weltraumgestützte Beobachtungen eingesetzt. Beide Beobachtungsarten ergänzen einander heute in idealer Weise. Die erdgebundenen Teleskope weisen meist größere

Primärspiegel und damit eine größere Lichtsammelleistung auf 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 unerlässlich bei Beobachtungen in Wellenlängenbereichen, in denen die Erdatmosphäre die einfallende Strahlung absorbiert oder einen störenden Hintergrund erzeugt, wie dies in weiten Teilen des infraroten Spektralbereichs der Fall ist.

An der Entwicklung der Infrarotastronomie hat das MPIA seit deren Pionierzeit in den siebziger Jahren erfolgreich teilgenommen. So war es kürzlich am weltweit ersten Infrarot-Weltraumobservatorium ISO der Europäischen Weltraumbehörde ESA maßgeblich beteiligt: ISOPHOT, eines von vier Messinstrumenten auf ISO, entstand unter der Federführung des Instituts. ISO lieferte von 1996 bis 1998 hervorragende Daten, insbesondere in dem bis dahin nicht zugänglichen Bereich des fernen Infrarot. Das hierbei gewonnene Know-how setzen die Wissenschaftler am Institut auch bei

Abb. I.2: Das Calar-Alto-Observatorium.



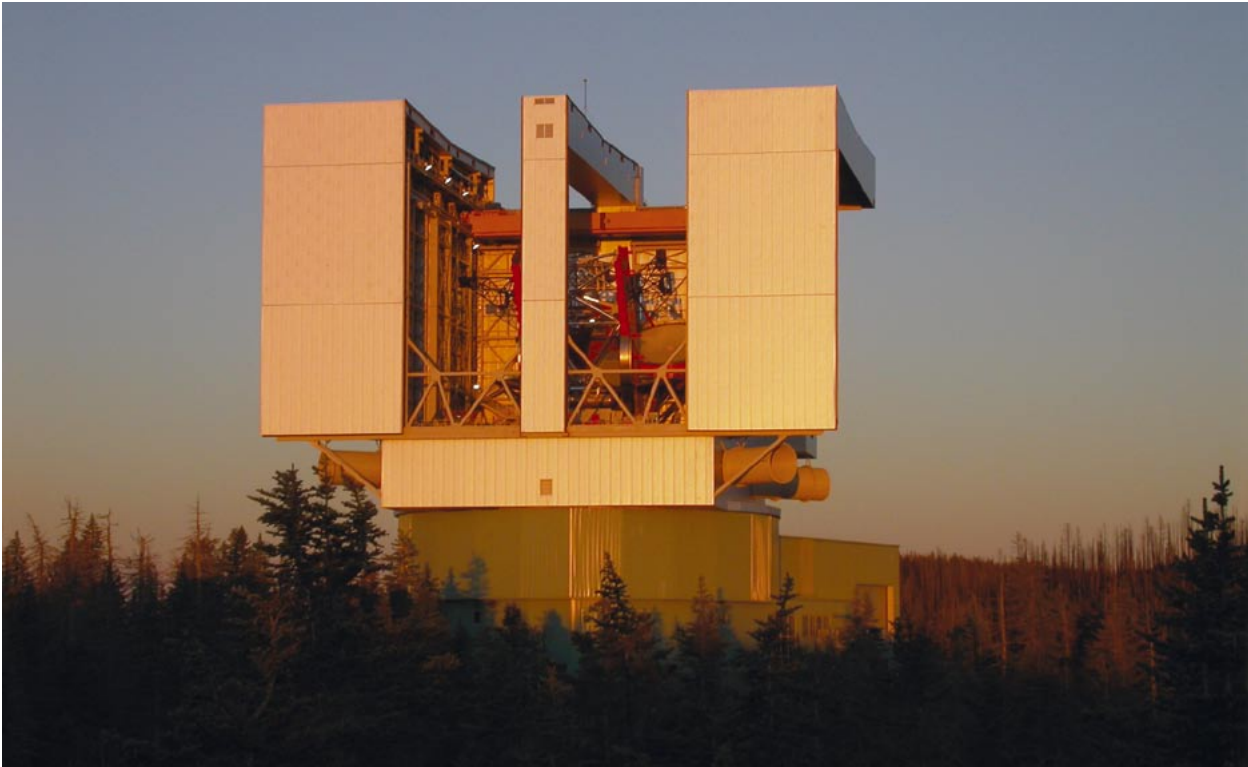
jetzt anlaufenden Projekten, wie den Weltraumteleskopen HERSCHEL und James Webb Space Telescope (JWST) ein. Wissenschaftler des Instituts sind gegenwärtig aktiv mit Beobachtungsprogrammen am US-amerikanischen Infrarot-Observatorium SPITZER beteiligt. Dabei geht es um eine Reihe aufregender Entdeckungen – zum Beispiel um Staubringe, die sonnenähnliche Hauptreihensterne im Alter von ein bis drei Milliarden Jahren umgeben – ganz ähnlich wie der Kuiper-Ring in unserem Sonnensystem vor etwa zwei Milliarden Jahren (Kap. II.2), um den Nachweis, dass Supernovae doch nicht wesentlich zum Staubgehalt der Interstellaren Materie beitragen (wie neulich irrtümlich festgestellt, vgl. Kap. II.3) und um die Entdeckung eines infraroten Lichtechos, das vom Neutronenstern im Zentrum des Supernova-Überrestes Cas A ausgeht: Offensichtlich hat der Neutronenstern, der bei einer Supernova-Explosion im Jahre 1680 entstand, noch vor 50 Jahren einen gewaltigen Gammastrahlen-Ausbruch erlebt, der nun durch den Staub in der weiteren Umgebung läuft und ihn kurzzeitig aufheizt.

Heute ist das Institut an einer Reihe internationaler Kollaborationen zum Bau neuer Großteleskope und

wissenschaftlicher Instrumente beteiligt. Damit hat es Zugang zu den bedeutendsten Observatorien der Erde. Auf der Südhalbkugel ist dies das Very Large Telescope (VLT) der ESO in Chile mit seinen vier 8-Meter-Teleskopen, die sich zu einer leistungsstarken interferometrischen Anordnung zusammenschließen lassen. Auf der Nordhalbkugel ist das MPIA am Large Binocular Telescope (LBT) in Arizona beteiligt, das 2005 den wissenschaftlichen Betrieb aufnehmen wird. Dann wird dieses außergewöhnliche Teleskop über zwei 8.4-Meter-Spiegel auf einer gemeinsamen Montierung verfügen und damit das weltweit größte Einzelteleskop sein. Diese beiden Kooperationen versetzen die Astronomen des MPIA in die Lage, den Nord- und Südhimmel mit erstklassigen Teleskopen zu erforschen. Gleichzeitig beteiligt sich das Institut aktiv an Studien zur Instrumentierung von Großteleskopen der nächsten Generation, den sogenannten Extremely Large Telescopes (ELTs).

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





Bodengebundene Astronomie – Instrumentierung

Abb. I.4: Das Large Binocular Telescope (LBT)

In den vergangenen Jahren hat das MPIA bei der Entwicklung adaptiv optischer Systeme große Anstrengungen unternommen. Abgeschlossen ist der Bau der Adaptiven Optik ALFA am 3,5-m-Teleskop auf dem Calar Alto. Derzeit werden diese Forschungen mit der Entwicklung eines Systems der multikonjugierten Adaptiven Optik weitergeführt. Die hierbei gesammelten Erfahrungen werden bereits in der Entwicklung neuer Instrumente am VLT und am LBT umgesetzt (Kap. IV.1). Im Labor für Adaptive Optik am Institut wurde ein Versuchsaufbau für den neuartigen Wellenfrontsensor PYRAMIR vorangetrieben (Kap. IV.6).

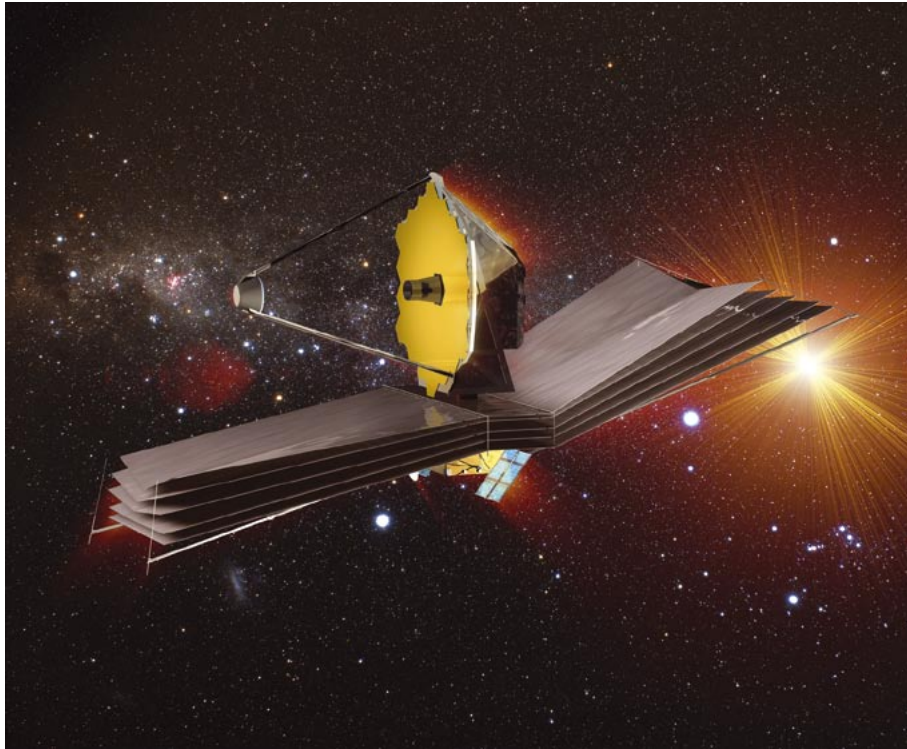
Die Beteiligung des Instituts am Very Large Telescope der ESO auf dem Paranal (Abb. I.3) ist von herausragender Bedeutung. Im Jahr 2001 ging die hochauflösende Infrarotkamera CONICA, die zusammen mit der Adaptiven Optik NAOS das System NACO bildet, erfolgreich in Betrieb. Ende 2002 folgte das »erste Licht« für MIDI. Es ist das erste interferometrische Instrument am VLT und wird im mittleren Infrarot eingesetzt. Mit diesem Instrument konnten sehr erfolgreiche interferometrische Beobachtungen im mittleren Infrarot mit einer Auflösung von einigen hundertstel Bogensekunden durchgeführt werden.

Für den Einsatz in Verbindung mit den Instrumenten NACO und SINFONI am VLT, die beide mit einer eigenen Adaptiven Optik ausgestattet sind, geht der Bau einer gemeinsamen Natrium-Laserleitsternanlage (Laser Guide Star Facility, LGSF) in die entscheidende Phase. Das

Herz der LGSF ist PARSEC, ein Hochleistungslaser, der bei einer Wellenlänge von 589 nm die Natriumschicht in der hohen Erdmesosphäre zum Leuchten anregt und damit die Adaptiven Optiken mit einem hinreichend hellen künstlichen Leitstern versorgt. Das vom MPIA gebaute Diagnosegerät LIDAR befindet sich seit Juni 2003 in Garching. Letzte Tests der gesamten LGSF, bestehend aus PARSEC, einem speziellen Lichtleiter und dem Projektionsteleskop, fanden in der ersten Jahreshälfte 2005 in Garching statt.

Die Installation auf dem Paranal ist für Herbst 2005 vorgesehen. Am MPIA arbeitet man bereits an der Entwicklung der VLT/VLTI-Instrumente der zweiten Generation. So ist das Institut am PLANET FINDER, einem Projekt zur Suche und Charakterisierung extrasolarer Planeten mit Hilfe von extremer Adaptiver Optik und weiteren Zusatzgeräten beteiligt. Das Projekt CHEOPS (Kap. IV.4) gehört zu diesem Komplex. Gleichzeitig arbeitet das MPIA zusammen mit Instituten in Genf und Leiden an den so genannten »Differential Delay Lines« für das PRIMA-System zur astrometrischen Suche nach extrasolaren Planeten. Ein weiteres Projekt – zusammen mit dem Observatoire de Nice – besteht in der Erweiterung von MIDI zu APRES-MIDI, einem Instrument, welches das Licht der vier Hauptteleskope des VLTI kombiniert und eine Bildrekonstruktion zulässt.

Zusammen mit der University of Arizona sowie italienischen und anderen deutschen Instituten ist das MPIA



Partner in einem internationalem Konsortium zum Bau des Large Binocular Telescope (LBT, Abb. I.4). Dieses Großteleskop besitzt zwei Spiegel mit einem Durchmesser von jeweils 8.4 Metern, die von einer gemeinsamen Montierung getragen werden. Beide Spiegel verfügen zusammen über eine Lichtsammelkraft, die jener eines einzelnen 11.8-Meter-Spiegels gleich kommt. Damit wird das LBT das weltweit leistungsstärkste Einzelteleskop sein. Die einzigartige Konstruktion des Doppelspiegels eignet sich zudem hervorragend für interferometrische Beobachtungen. Im interferometrischen Betrieb entspricht das räumliche Auflösungsvermögen des LBT dem eines Spiegels mit 22.8 Metern Durchmesser. Erstes »wissenschaftliches« Licht mit nur einem Hauptspiegel ist für Herbst 2005 geplant, ein Jahr später soll das gesamte Teleskop in Betrieb gehen.

Die deutschen Partner bauen unter der Leitung der Heidelberger Landessternwarte für das LBT den Nahinfrarot-Spektrographen LUCIFER (Kap. IV.2). Das MPIA liefert hierfür das gesamte Detektorpaket und entwickelt das Gesamtkonzept der Kühlung. Auch die Integration und die Tests des Instruments werden in den Laboratorien des Instituts erfolgen. Gleichzeitig laufen die Planungen für das LBT-Interferometer, das mit Adaptiver Optik ausgestattet sein wird, auf Hochtouren. Das MPIA konzipiert hierfür die Optik der Strahlzusammenführung LINC (Kap. IV.1). Letztlich soll Interferometrie über einen Wellenlängenbereich von $0.6\ \mu\text{m}$ bis $2.2\ \mu\text{m}$ möglich sein. Für dieses Projekt wurde ein Konsortium mit Kollegen des MPI für Radioastronomie in Bonn, der Universität Köln und des Osservatorio Astrofisico di Arcetri bei Florenz gebildet.

Abb. I.5: Mögliche Konstruktion des JWST, mit dem großen Hauptspiegel und dem charakteristischen Sonnenschutz.

Infrarot-Weltraumastronomie – Instrumentierung

Das MPIA ist noch wesentlich am Projekt ISO der Europäischen Weltraumbehörde ESA beteiligt: ISOPHOT, eines von vier Messinstrumenten auf ISO, entstand unter der Federführung des Instituts. Mittlerweile sind zahlreiche, auf Messungen mit ISO basierende wissenschaftliche Arbeiten aus allen Bereichen der Astronomie erschienen, welche die Leistungsfähigkeit dieses Weltraumteleskops dokumentieren. Am MPIA wird das ISOPHOT-Datenzentrum geführt, wo zunächst die Programme und Kalibrationsverfahren für die automatische Datenanalyse entwickelt wurden. Die ISO-Datenbasis soll zum Bestandteil eines weltweit zugänglichen »Virtuellen Observatoriums« für alle Wellenlängenbereiche werden.

Die mit ISOPHOT gewonnenen Erfahrungen waren ausschlaggebend für die Beteiligung des MPIA am Bau der Infrarotkamera (mit Spektrometer) PACS (Kap. IV.8). Dieses Instrument wird an Bord des europäischen Infrarotobservatoriums HERSCHEL arbeiten, eines Weltraumteleskops mit 3.5 Metern Öffnung, dessen Start für das Jahr 2007 vorgesehen ist.

Das Institut ist auch am Nachfolger des Weltraumteleskops HUBBLE, dem James Webb Space Telescope (JWST), beteiligt (Abb. I.5). Das JWST wird einen ausklappbaren Hauptspiegel mit etwa sechs Metern Durchmesser sowie drei Fokalinstrumente erhalten. Im Rahmen eines europäischen Konsortiums entwickelt das MPIA

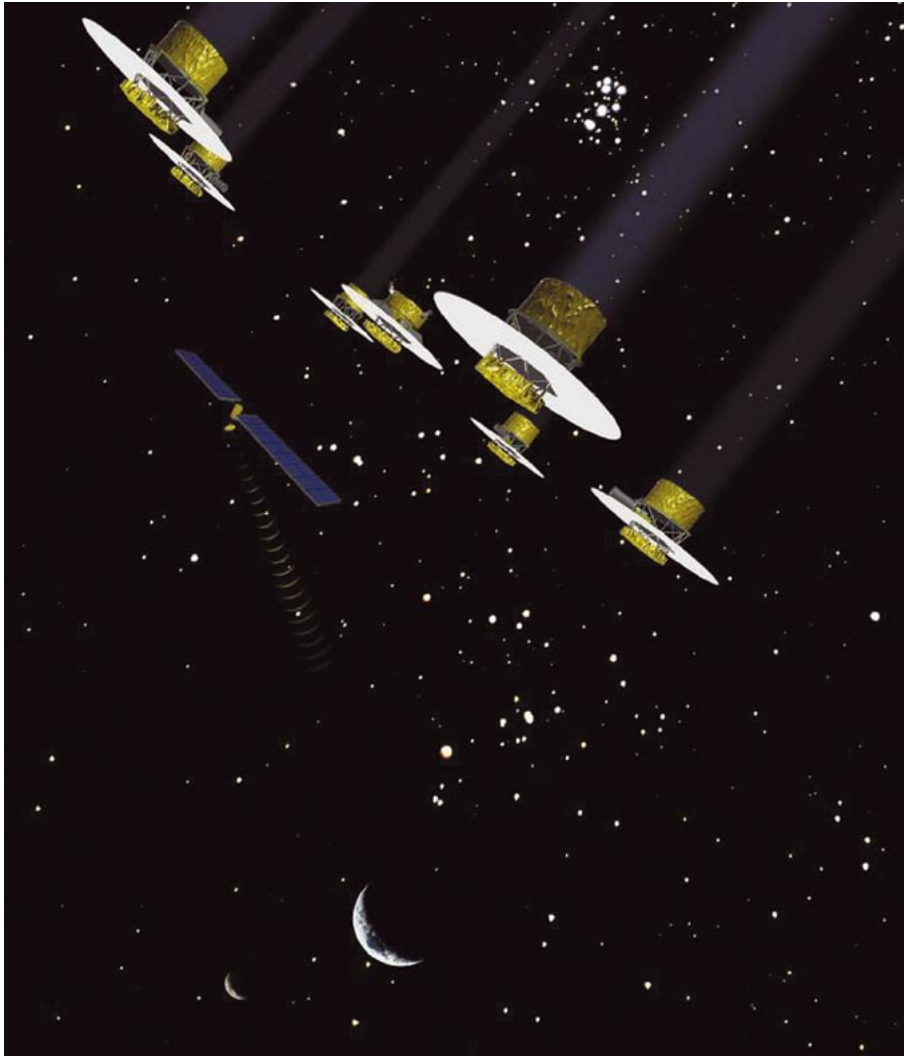


Abb. I.6: Mögliches Konzept des Weltrauminterferometers DARWIN mit sechs frei fliegenden Einzelteleskopen.

die Kryo-Mechanismen zur Positionierung der optischen Komponenten in einem der drei Fokalinstrumente, genannt MIRI (Kap. IV.9). 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 (Kap. IV.9). Auch hier soll das Institut kryogene Mechaniken beisteuern. Ein solcher Beitrag würde den Astronomen des MPIA weitere hervorragende Beobachtungsmöglichkeiten mit hoher Auflösung im Infraroten bieten. Auf beide Aufgaben, MIRI und NIRSPEC, ist das Institut durch die erfolgreichen Entwicklungen von ISOPHOT und PACS gut vorbereitet.

Seit 1998 vertritt das MPIA Deutschland in der DARWIN Science Advisory Group. DARWIN (Abb. I.6) ist ein Weltrauminterferometer der Europäischen Weltraumbehörde ESA, das nach 2015 starten soll. Nach der derzeitigen Planung wird es aus bis zu acht Teleskopen bestehen, die im Lagrange-Punkt L2, in 1.5 Millionen Kilometer Abstand von der Erde, die Sonne umkreisen. Mit diesem Observatorium will man im mittleren Infrarot extrasolare Planeten abbilden und spektroskopisch analysieren. Derzeit beteiligt sich das Institut an vorbereitenden Technologiestudien.

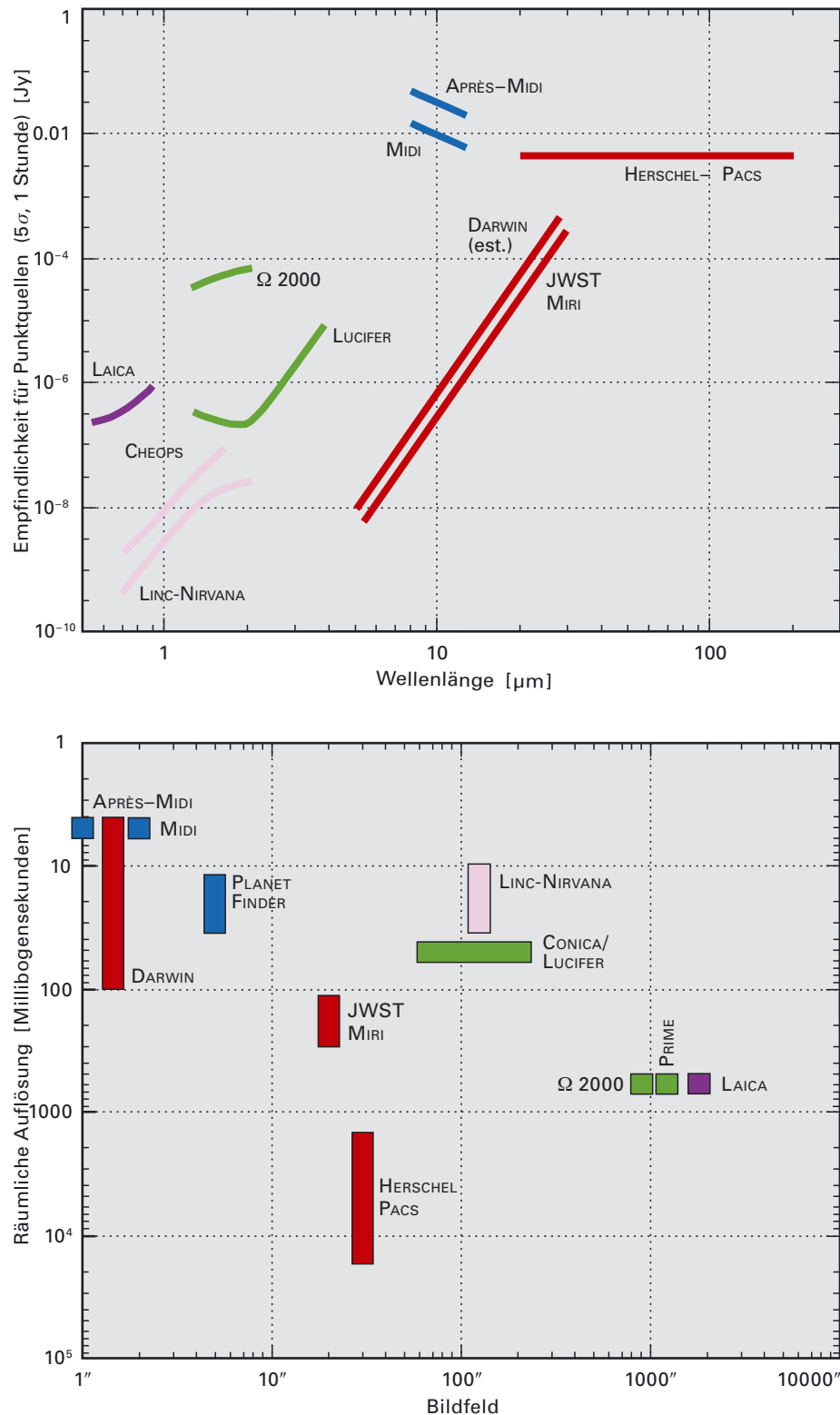
Auch an dem Weltraumprojekt GAIA der ESA wirkt das MPIA mit. GAIA ist ein Observatorium, das zwischen 2010 und 2012 starten soll. Es wird der Nachfolger des Astrometriesatelliten HIPPARCOS sein, jedoch mit einer um mehrere Größenordnungen höheren Empfindlichkeit. So soll GAIA die Positionen, Helligkeiten und Radialgeschwindigkeiten von einer Milliarde Sterne plus zahlreichen Galaxien, Quasaren und Asteroiden bestimmen. Das Teleskop liefert photometrische Daten in 15 Filterbereichen sowie Spektren in einem ausgewählten Spektralbereich. Anders als HIPPARCOS wird GAIA je-

doch keinen Inputkatalog erhalten. Daher wird in der Datenauswertung zur automatischen Klassifikation der Himmelskörper eine große Bedeutung zukommen. Am MPIA beschäftigt man sich derzeit mit diesem Problem.

Einen Überblick über die wichtigsten bereits arbeitenden und demnächst anlaufenden Instrumente vermittelt Abb. I.7. Sie zeigt oben die Empfindlichkeit in

Abhängigkeit von der Wellenlänge und unten die räumliche Auflösung in Abhängigkeit von der Bildfeldgröße.

Abb. I.7: Die wichtigsten Instrumente des Instituts. Oben die Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge, unten die räumliche Auflösung in Abhängigkeit vom Bildfeld.



I.3 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Institut verdankt seinem Standort in Heidelberg die Möglichkeit, in einem astronomisch besonders aktiven Umfeld zu wirken. Die Zusammenarbeit mit der Landessternwarte, dem Astronomischen Rechen-Institut, dem Institut für Theoretische Astrophysik der Universität oder der Abteilung Kosmophysik des MPI für Kernphysik hat sich immer wieder in vielfältiger Weise ergeben. Dies gilt derzeit vor allem für den DFG-Sonderforschungsbereich Nr. 1700, »Galaxien im jungen Universum«, an dem alle genannten Heidelberger Institute beteiligt sind.

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

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

An FRINGE sind das Astrophysikalische Institut Potsdam, das Astrophysikalische Institut der Universität Jena, das Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg, das MPI für extraterrestrische Physik in Garching, das MPI für Radioastronomie in Bonn, die Universität Hamburg und das I. Physikalisches Institut der Universität Köln beteiligt.

Das MPIA ist an einer Reihe von EU-Netzwerken und weltweiten Kollaborationen beteiligt, 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.



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

Im Rahmen von OPTICON beteiligt sich das Calar-Alto-Observatorium mit dem 2.2- und dem 3.5-m-Teleskop am Programm COMET, das insgesamt 20 europäische Teleskope umfasst. Beobachtergruppen aus allen Ländern der EU und aus assoziierten Ländern, denen vom Programmkomitee des DSAZ Beobachtungszeit an den Teleskopen zugeteilt wurde, erhalten freien Zugang sowie wissenschaftliche und technische Unterstützung bei der Durchführung ihrer Beobachtungen. OPTICON gewährt dafür dem DSAZ einen finanziellen Ausgleich.

Ebenfalls mit Förderung von OPTICON und der European Interferometry Initiative (EII), wird am MPIA die oben bereits erwähnte Studie zu APRES-MIDI durchgeführt. Weiterhin werden Software-Arbeiten zur Bildrekonstruktion für LINC-NIRVANA (Kap. IV.1) unterstützt.

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



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

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

SPITZER Legacy Program FEPS: SPITZER, das Infrarotteleskop der NASA (vormals SIRTf), begann am 25. August 2003 seine für die Dauer von zweieinhalb Jahren geplante Mission. Im Rahmen eines so genannten »Legacy Program« erhalten Kollaborationen die Möglichkeit, groß angelegte Beobachtungsprogramme durchzuführen. Das MPIA beteiligt sich an einem solchen, bereits genehmigten Programm zur Untersuchung der Entwicklung von protoplanetaren Scheiben hin zu Planetensystemen.

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 und ESO, Garching

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

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

I.4 Lehre und Öffentlichkeitsarbeit

Diplomanden und Doktoranden aus der ganzen Welt kommen 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 an der Universität in Jena nehmen Mitarbeiter der dortigen Außenstelle des MPIA Lehrverpflichtungen wahr. Am Institut wird im Rahmen des Fortgeschrittenenpraktikums für Heidelberger Physik- und Astronomiestudenten ein Versuch zur Adaptiven Optik angeboten: Innerhalb von vier Nachmittagen können die Studenten einen Analysator zur Untersuchung der Verformung von Lichtwellen aufbauen und optische Aberrationen wie Koma und Astigmatismus bestimmen. Der Versuch findet im Labor für Adaptive Optik am MPIA statt. Und am 70-cm-Teleskop des MPIA auf dem Königstuhl wird der Praktikumsversuch »Stellare CCD-Photometrie« durchgeführt.

Im Juli 2004 etablierten die Max-Planck-Gesellschaft und die Universität Heidelberg eine gemeinsame »International Max Planck Research School für Astronomie und Kosmische Physik«. Die Schule wird für zunächst 40 Doktoranden aus aller Welt eine dreijährige Ausbildung in der experimentellen und theoretischen Forschung auf dem Gebiet der Astronomie und der kosmischen Physik unter hervorragenden Bedingungen bieten. 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 regelmäßig Vorträge in Schulen, Volkshochschulen und Planetarien und treten insbesondere anlässlich in der Öffentlichkeit stark beachteter astrono-

mischer 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.

Auf Einladung der Klaus Tschira Stiftung beteiligte sich das MPIA zusammen mit den anderen Heidelberger Astronomischen Instituten an einem Symposium zum Thema »Die Planeten der Sonne und der fernen Sterne – Begegnung zwischen Astronomie und Geo-wissenschaften«. Das Symposium fand am 26. Oktober im Studio der Villa Bosch statt. Neben der wissenschaftlichen Diskussion diskutierten die Forscher mit Journalisten und Medienfachleuten über die optimale Vermittlung der Forschungsergebnisse an die Öffentlichkeit.

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

In Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung, Donaueschingen, und mit Unterstützung der Klaus Tschira Stiftung ist im Berichtsjahr ein Schulprojekt initiiert worden, mit folgendem Inhalt: Zu ausgewählten Berichten, die in SuW erscheinen, wird monatlich ausführliches didaktisches Material entwickelt und im Internet frei zugänglich gemacht. Damit sind Lehrer und Schüler in der Lage, die in SuW allgemeinverständlich beschriebenen aktuellen Themen aus der Forschung im regulären Physik-Unterricht zu behandeln. Das Projekt löst bei Lehrern und Schülern bundesweit reges Interesse aus.

II. Highlights

II.1 Staubwachstum in protoplanetaren Scheiben

Protoplanetare Scheiben bilden sich aus dem Material interstellarer Wolken. Dementsprechend sind die Staubteilchen anfangs nicht einmal einen Mikrometer groß. Durch Zusammenlagerung (Koagulation) wachsen sie zu Körnern mit Durchmessern von einigen Millimetern oder Zentimetern heran – dies ist die erste Phase der Planetenentstehung. Bislang gibt es jedoch nur sehr wenige überzeugende Hinweise auf die Existenz solcher großer Partikel. Ein deutsch-amerikanisches Team unter der Leitung des MPIA beobachtete mit dem Very Large Array (VLA) mehrere junge Sterne im Sternentstehungsgebiet Taurus-Auriga. Die Daten belegen, dass sich millimetergroße Teilchen bereits innerhalb von einer Million Jahre bilden.

Astronomische Beobachtungen zeigten, dass die Infrarot-Emission protoplanetarischer Scheiben innerhalb von etwa zehn Millionen Jahren signifikant abnimmt (siehe Kap. II.2). Die Ursache hierfür ist nicht eindeutig bekannt. Entweder verschwindet der Staub aus dem System, oder die Teilchen wachsen zu kleinen Körnern heran, die nicht mehr so intensiv im Infraroten strahlen (Abb. II.1.1).

Will man millimeter- oder zentimetergroße Staubteilchen nachweisen, so muss man bei größeren Wellenlängen beobachten, die in der Größenordnung der Teilchen selbst liegt. Doch auch hier sind die Beobachtungsergebnisse nicht eindeutig, sofern die Scheiben räumlich nicht aufgelöst sind: Optisch dicke Staubscheiben mit sehr kleinen Teilchen lassen sich nicht von optisch dünnen Scheiben mit größeren Partikeln unterscheiden. Erst hoch aufgelöste Beobachtungen im Millimeter- und Submillimeterbereich ermöglichen es, diese Zweideutigkeit zu lösen.

Nach technischen Verbesserungen am Very Large Array in Socorro, New Mexico, sind solche Beobachtungen seit kurzer Zeit möglich. Astronomen des Instituts und

Abb. II.1.1: Drei Phasen der Planetenentstehung. *Links:* Die Zusammenlagerung von Staubteilchen bis zu einigen Mikrometern Größe. *Mitte:* weiteres Anwachsen der Teilchen bis zur Größe von Planetesimalen unter Einfluss der Gravitation. *Rechts:* Zusammenlagerung von Planetesimalen zu Planeten, die aus der Umgebung Gas akkretieren und so eine Atmosphäre aufbauen.

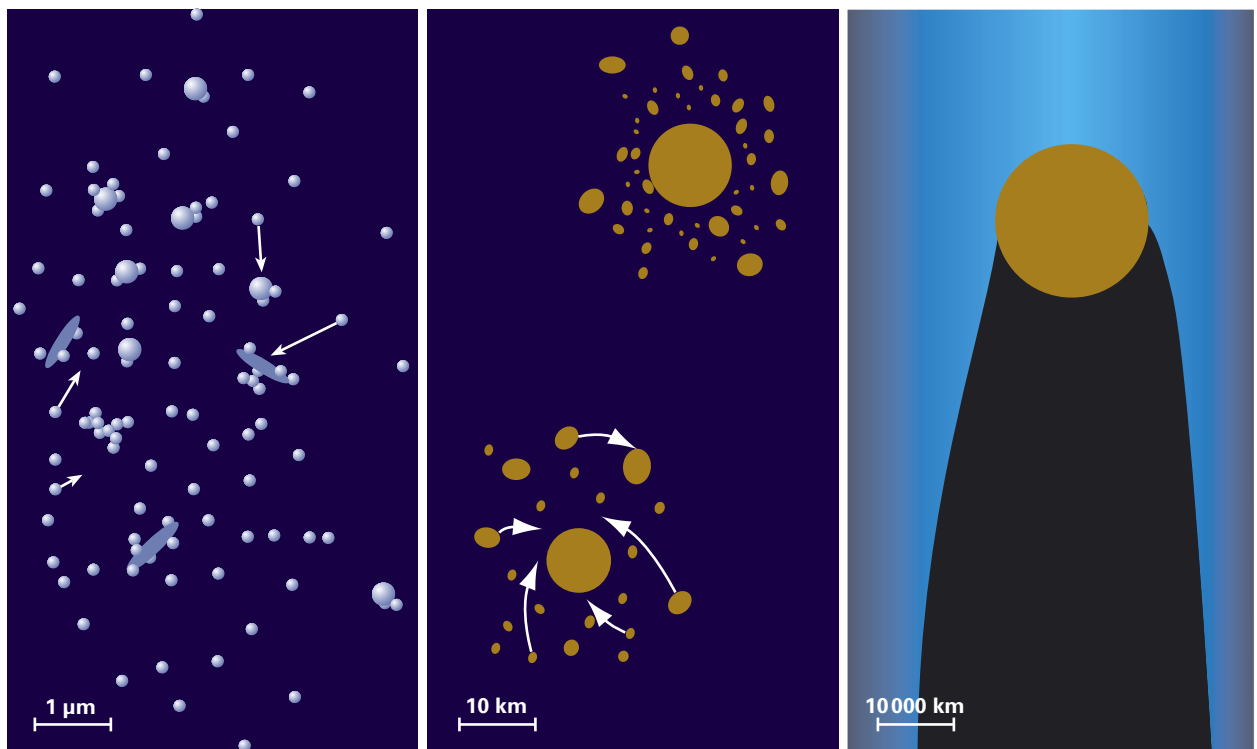
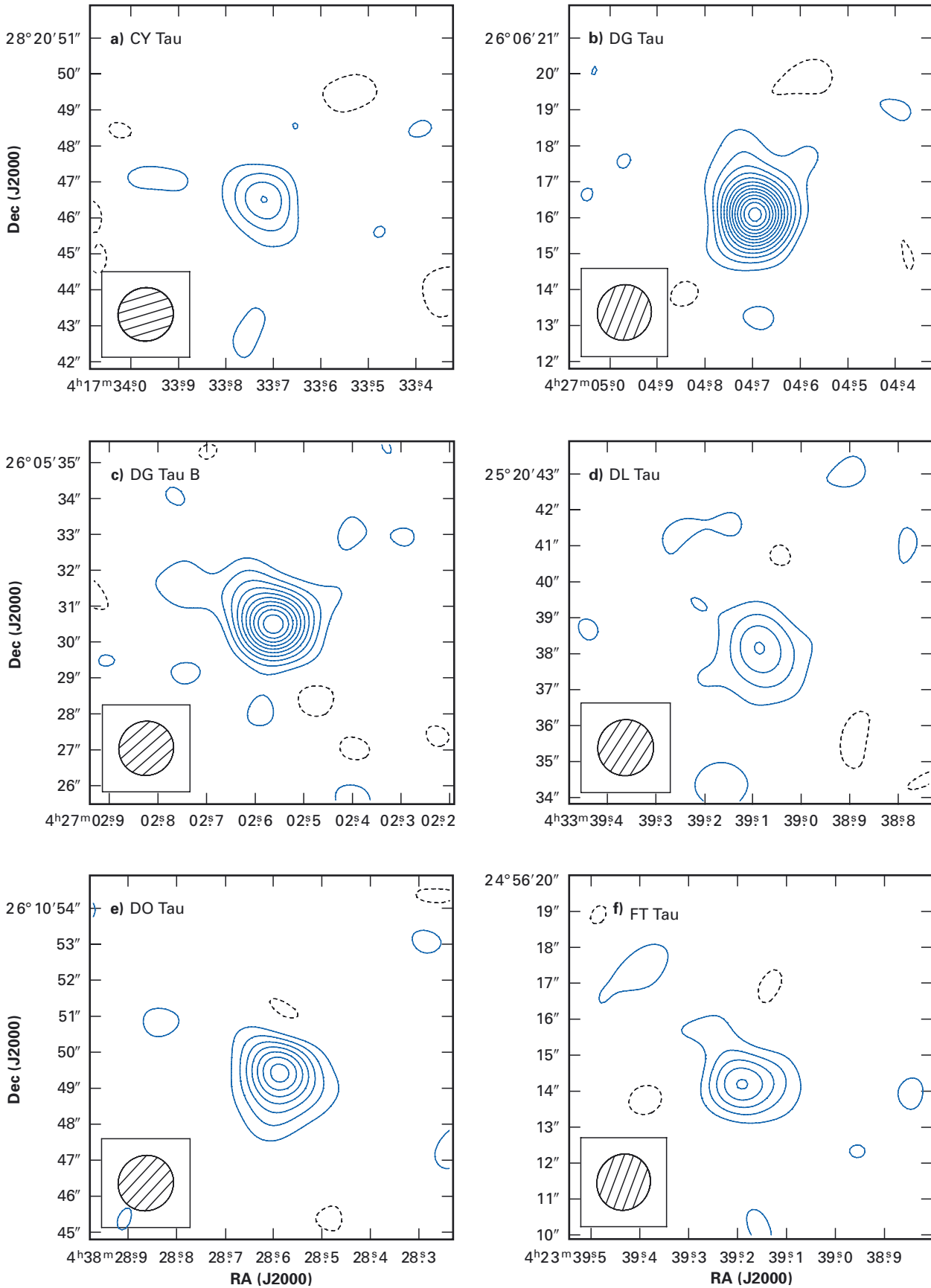
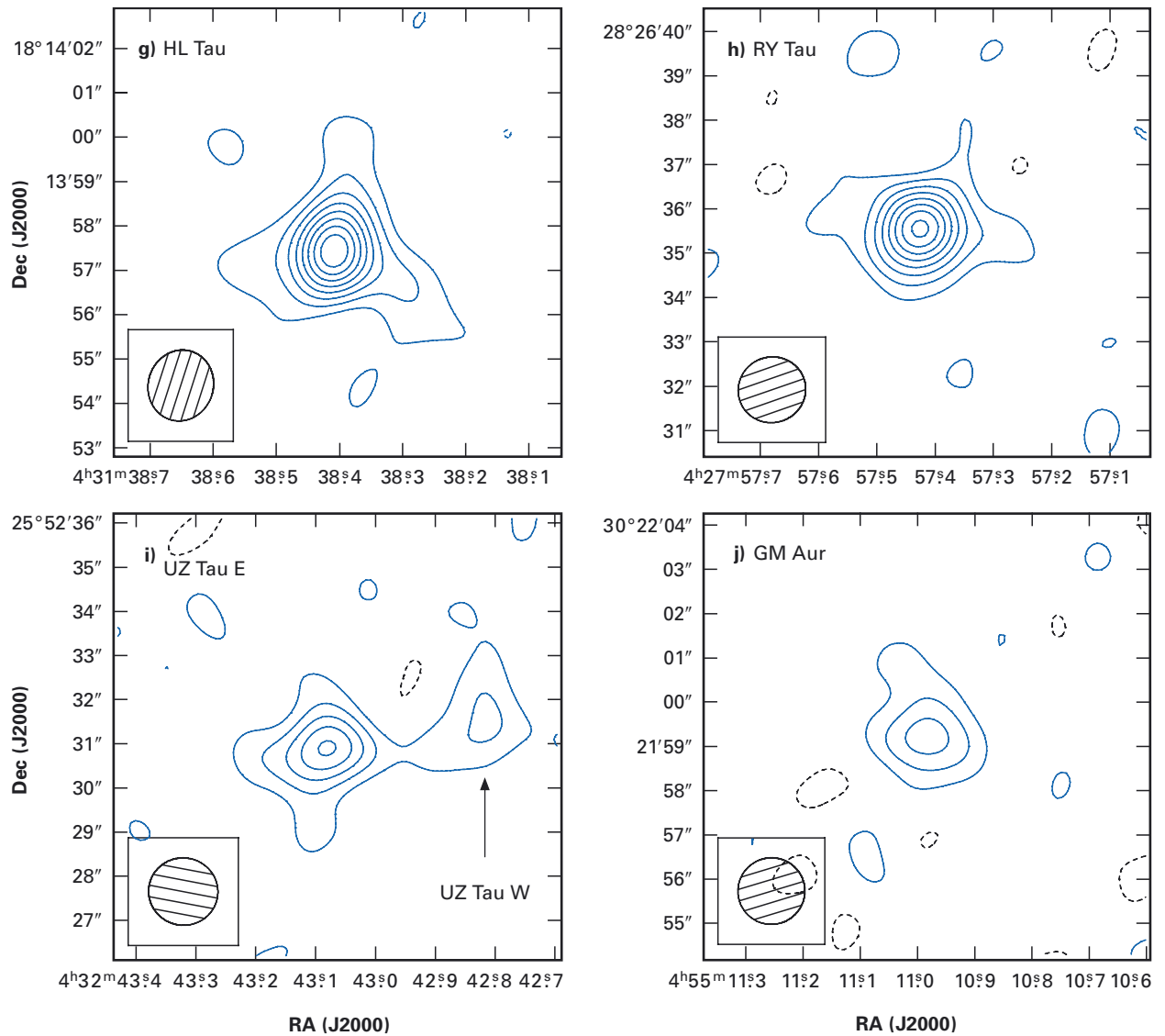


Abb. II.1.2: Zehn T-Tauri-Sterne, deren protoplanetare Scheiben sich bei 7 mm Wellenlänge räumlich auflösen ließen.
(Fortsetzung S. 20)





Kollegen aus den USA beobachteten im Berichtsjahr 14 massearme Vor-Hauptreihensterne (so genannte T-Tauri-Sterne) bei 7 mm Wellenlänge. Sie befinden sich in dem 140 pc (460 Lj) entfernten Taurus-Auriga-Komplex, ihr Alter liegt im Bereich von 100 000 bis drei Millionen Jahren. Die Massen von 13 Sternen dieser Gruppe liegen zwischen 0.5 und 0.7 Sonnenmassen, nur einer (RY Tau) ist mit 1.7 Sonnenmassen erheblich massereicher. Bei allen 14 Sternen ließ sich Emission bei 7 mm Wellenlänge nachweisen, bei zehn von ihnen konnte die Scheibe sogar wie erhofft räumlich aufgelöst werden. Ihre Größen liegen zwischen 100 und 200 Astronomischen Einheiten (Abb. II.1.2).

Bevor die Messdaten interpretiert werden konnten, musste noch ein Störeffekt berücksichtigt werden. T-Tauri-Sterne weisen starke Sternwinde auf, die in ihrer Umgebung Bremsstrahlung erzeugen. Diese tritt zwar vorwiegend bei Wellenlängen im Zentimeterbereich auf, trägt aber auch zur Millimeter-Emission bei und überlagert somit die Strahlung des Staubes. Um diesen

Anteil zu ermitteln, wurden fünf Objekte zusätzlich bei größeren Wellenlängen von 1.3, 2.0 und 3.6 cm beobachtet, bei vier von ihnen ließ sich die Bremsstrahlung nachweisen. Hieraus ließ sich ableiten, dass diese zur Millimeter-Emission im Mittel etwa 60 % beiträgt. Dieser Anteil wurde bei der anschließenden Analyse und Interpretation der Daten berücksichtigt.

Zunächst einmal kann man angesichts der Größe der Scheiben davon ausgehen, dass die Emission bei 7 mm überwiegend optisch dünn ist. Lediglich ein geringer Anteil aus dem optisch dichten, inneren Bereich der Scheibe kommt hinzu. Aus der gemessenen Emission bei 7 mm und anderen Beobachtungen im Millimeterbereich wurde die spektrale Energieverteilung der zirkumstellaren Scheiben bestimmt. Aus ihrem Verlauf ließ sich der so genannte Opazitätsindex ermitteln (Abb. II.1.3). Er ist ein Maß für die Größe der Teilchen. Für interstellare Teilchen mit Größen im Submikrometerbereich besitzt er etwa den Wert 2, bei sehr großen Körpern, die fast das gesamte Licht absorbieren, sinkt er auf null ab.

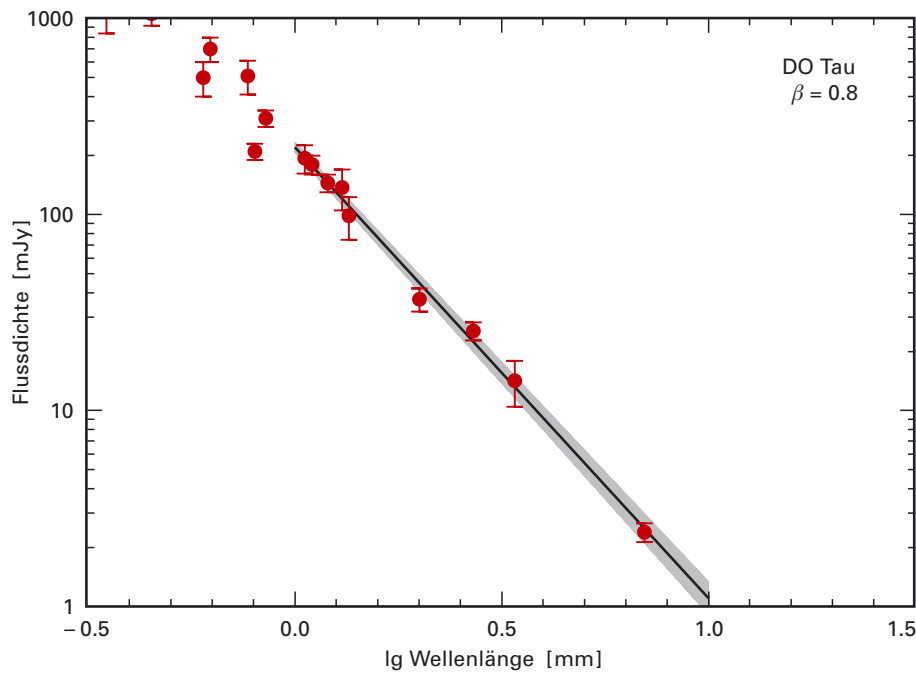


Abb. II.1.3: Spektrale Energieverteilung des T-Tauri-Sterns DO Tau. Aus dem Anstieg der Kurve ergibt sich ein Opazitätsindex von rund 0.8.

Bei fast allen beobachteten Objekten ergaben sich Opazitätsindizes kleiner als 2, bei etwa der Hälfte von ihnen kann man aus den Werten auf die Existenz von Teilchen mit Größen im Millimeterbereich schließen. Damit liegen eindeutige Hinweise auf das Staubteilchenwachstum in protoplanetaren Scheiben um T-Tauri-Sterne vor.

Die Untersuchung der Teilchengröße ist ein wichtiger Schritt zum Verständnis der Entstehung der Planetesimale. Diese rund zehn Kilometer großen Brocken liefern das »Baumaterial« zur Bildung von großen Planetenkörpern. Wie es die submikrometergroßen Staubteilchen schaffen, relativ schnell zu solchen Dimensionen anzuwachsen, ist noch nicht geklärt. Das MPIA ist mit Beobachtungen, Modellrechnungen und Laborexperimenten aktiv an der Erforschung des Problems beteiligt.

*(Jens Rodmann, Thomas Henning.
Beteiligte Institute in den USA: NRAO, Socorro;
University of Maryland, College Park;
Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics,
Cambridge.)*

II.2 Die Entwicklung protoplanetarer Scheiben

– mit dem Weltraumteleskop SPITZER beobachtet

Die meisten sonnenähnlichen Sterne sind in ihrer Entstehungsphase von Staubscheiben umgeben – so viel gilt heute als sicher. Zumindest in einigen dieser Scheiben entstehen schließlich auch Planeten, wie unser Sonnensystem und die mehr als 150 seit 1995 entdeckten extrasolaren Planeten zeigen. Viele Fragen zur Entwicklung der Planeten aus den winzigen Staubkörnern der zirkumstellaren Scheiben sind jedoch noch offen. Das amerikanische Weltraumteleskop SPITZER (Abb. II.2.1 und II.2.2) ermöglicht seit kurzem die Beobachtung solcher Objekte bis ins ferne Infrarot. Mit SPITZER wird das Legacy Science Program zur Entstehung und Entwicklung planetarischer Systeme durchgeführt, an dem Astronomen des MPIA beteiligt sind. Erste Ergebnisse zeigen, dass sich die Scheiben innerhalb von zehn Millionen Jahren auflösen. Aber auch bei älteren Sternen gibt es Staub, der vermutlich in einer Art Kuiper-Ring vorliegt.

Nach heutigen Vorstellungen läuft die Entstehung von Planeten in mehreren Stufen ab. Zunächst sind Staub und Gas in der protoplanetaren Scheibe vermischt. Die festen Partikel wachsen an, indem sie zusammenstoßen und aneinander haften bleiben. Die dadurch immer schwerer werdenden Teilchen sinken aufgrund der Schwerkraft zur Mittelebene des Systems und bilden dort eine verhältnismäßig dünne Staubscheibe. Da durch diesen Prozess die Staumdichte zunimmt, stoßen die Teilchen jetzt öfter zusammen und werden so zu Planetesimalen mit einigen Kilometern Durchmesser. Diese Körper können sich bereits aufgrund gravitativer Wechselwirkung zu Planeten zusammenlagern.

Hat sich in den äußeren Bereichen der Staubscheibe ein großer Planet gebildet, so sammelt er anschließend aus der Umgebung weiter Gas auf und umgibt sich mit einer gewaltigen Atmosphäre. Computersimulationen zeigen, dass ein großer Planet entlang seiner Bahn die Scheibe ge-

Abb. II.2.1: Das Infrarotteleskop SPITZER im April 2003 bei der Integration in die Trägerrakete.

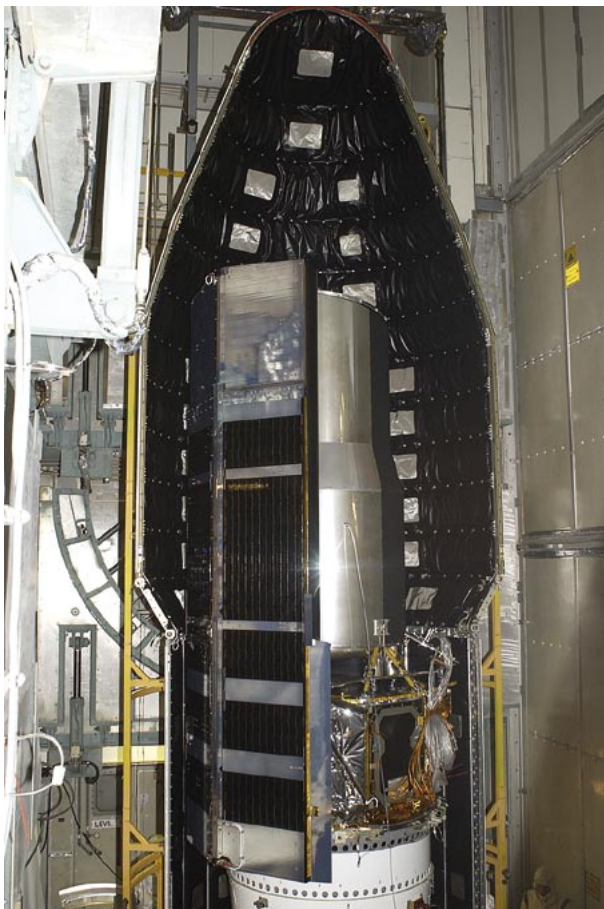


Abb. II.2.2: Cape Canaveral, 25. August 2003: Start des Infrarotteleskops SPITZER mit einer DELTA 7920 H.



wissermaßen leer fegt und eine ringförmige Lücke erzeugt. Auf diese Weise sind vermutlich die Gasriesen wie Jupiter und Saturn entstanden.

Doch auch in älteren Systemen, wie unserem eigenen Sonnensystem, gibt es noch erhebliche Mengen an Staub. Dieser wird ständig durch Zusammenstöße von Planetoiden nachgeliefert. Eine dünne Scheibe im inneren Planetensystem streut das Sonnenlicht, das als Zodiakallicht am Himmel erkennbar ist.

Mit astronomischen Beobachtungen lassen sich die beschriebenen Entwicklungsstadien bislang nur in sehr eingeschränktem Maße verifizieren. Das Hauptproblem besteht darin, dass der Zentralstern die Scheibe überstrahlt. Viele Fragen sind deshalb noch umstritten, so zum Beispiel, wie lange die Scheiben existieren, und auf welchen Zeitskalen die Planeten entstehen.

Mit dem im August 2003 gestarteten amerikanischen Weltraumteleskop SPITZER will man in einem von insgesamt sechs »Legacy Science Programs« diesen Fragen gezielt nachgehen. Diese Programme bieten die Möglichkeit, ausgewählte Problemstellungen systematisch und mit großem Aufwand anzugehen. Hierfür steht das Teleskop üblicherweise für hundert Stunden und mehr bereit.

In dem Programm »The Formation and Evolution of Planetary Systems: Placing Our Solar System in Context« werden 330 Sterne mit Spektraltypen F8V bis K3V und einem Alter von etwa drei Millionen bis drei Milliarden Jahren beobachtet. Drei Instrumente für Abbildungen und Spektroskopie bei Wellenlängen von 3 μm bis 160 μm stehen hierfür an Bord von SPITZER zur Verfügung.

Junge Sterne mit Staubscheiben

Wie hoch ist der Anteil an jungen Sternen, die eine protoplanetare Scheibe besitzen, und wie lange existieren diese Scheiben? Diesen Fragen gehen Astronomen des MPIA und ihre Kollegen aus den USA nach. Hierfür wählten sie eine Gruppe von 74 Sternen aus, deren Masse zwischen 0.8 und 1.2 Sonnenmassen und deren Entfernung zwischen 125 und 550 Lichtjahren liegt, und die nicht älter als 30 Millionen Jahre sind. Genauer: 29 Sterne sind drei bis zehn Millionen Jahre und 45 sind zehn bis 30 Millionen Jahre alt. Mit einer gewissen Streuung in der Masse repräsentiert diese Gruppe damit die Entwicklung unserer jungen Sonne.

Von diesen Sternen liegen photometrische Daten der Infrared Array Camera (IRAC) im Wellenlängenbereich von 3.6 bis 8.0 μm vor. In diesem Bereich strahlt heißer Staub in den inneren Zonen einer möglichen Staubscheibe bis in etwa drei Astronomischen Einheiten Entfernung vom Stern. Wie Abb. II.2.3 zeigt, gibt es in dieser Gruppe fünf Sterne mit einer verstärkten Emission im Infraroten, die auf eine Staubscheibe hindeutet. In Abb. II.2.4 ist ihre spektrale Energieverteilung aufgetragen, wobei zusätzliche Daten der Infraratsatelliten IRAS und ISO sowie von (Sub-)Millimeterteleskopen aufgenommen wurden.

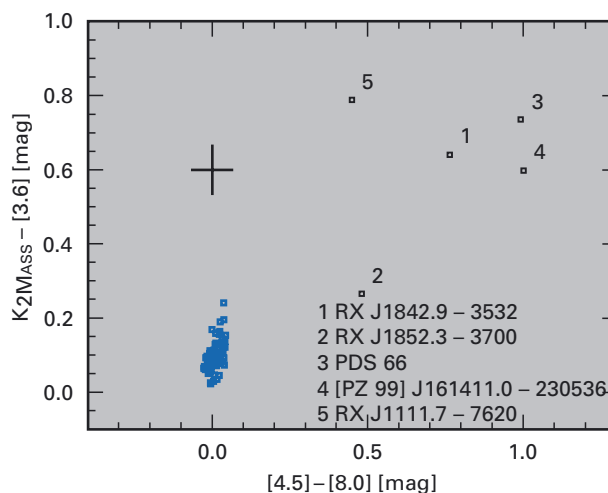


Abb. II.2.3: Farbdiagramm der untersuchten Sterne. K2MASS steht für Daten des Infrarotsurveys bei 2 μm Wellenlänge. Die fünf von Staubscheiben umgebenen Sterne fallen durch ihre starke Emission bei 3.6 und 8.0 μm auf.

Interessanterweise gehören vier der fünf Sterne zu der jungen Gruppe (drei bis zehn Millionen Jahre alt) und nur einer zur älteren (10 bis 30 Mio. Jahre). Der Anteil der Sterne mit Scheiben nimmt also von 14 % auf 2 % ab. Ähnliches hatten andere Untersuchungen ergeben, wonach der relative Anteil an Scheiben bei einer Million Jahre alten Sternen noch mehr als 80 % beträgt, bei fünf bis zehn Millionen Jahren nur noch 10 %.

Trotz der geringen Statistik unterstützt dieser Befund die Theorie, wonach der feine Staub nach zehn Millionen Jahren weitgehend verschwunden ist. Dieser Effekt lässt sich noch auf andere Weise präzisieren. Die Kamera IRAC an Bord von SPITZER ist so empfindlich, dass sie in einer für diese Sterngruppe typischen Entfernung noch Staub mit einer Gesamtmasse von etwa 10^{-10} Sonnenmassen nachweisen könnte. Zum Vergleich: Submillimeter-Beobachtungen haben ergeben, dass sonnenähnliche Sterne im Alter von wenigen Millionen Jahren von $1/1000$ bis $1/10$ Sonnenmassen Staub umgeben sind. Auch dies spricht für das Verschwinden eines Großteils der Scheibe innerhalb der ersten zehn Millionen Jahre.

Allerdings ist bei der Interpretation insofern Vorsicht geboten, als es in den äußeren Bereichen der Scheiben große Mengen an kühlem Staub geben kann, der jenseits der Maximalwellenlänge von 8 μm leuchtet. Dennoch ist unverkennbar, dass sich die Scheiben relativ rasch auflösen. Wie fügen sich diese Erkenntnisse in die Theorien von der Entstehung unseres Sonnensystems ein?

Einigen Modellvorstellungen zufolge können sich in dichten Scheiben innerhalb einer Million Jahre Planetesimale bis hin zu einem Kilometer Durchmesser bilden. Wenn diese Körper zusammenstoßen, zerstören sie sich bei hohen Relativgeschwindigkeiten gegensei-

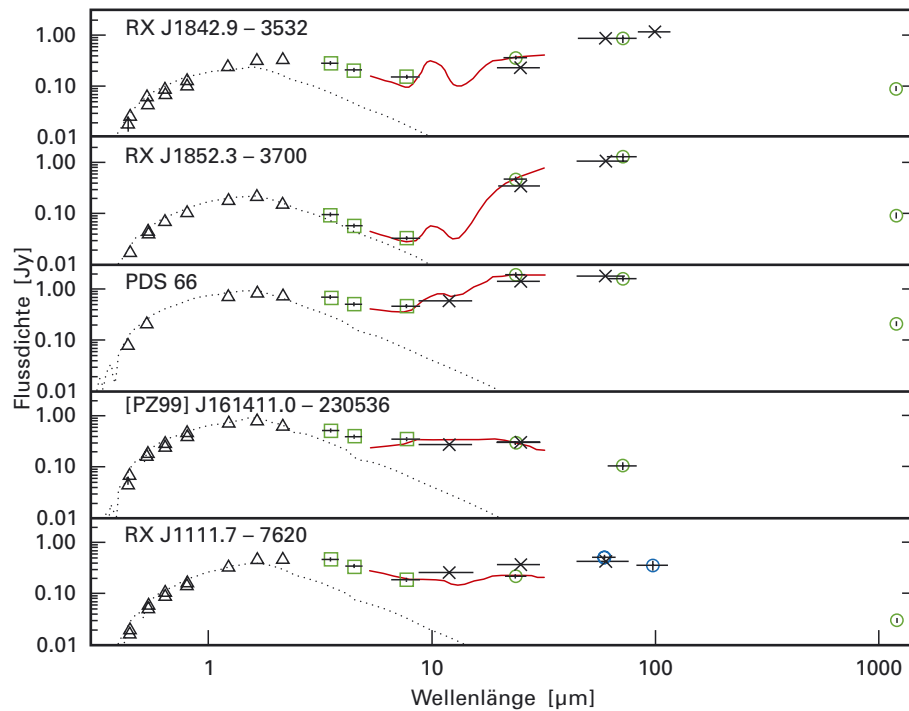


Abb. II.2.4: Spektrale Energieverteilungen der fünf Sterne, die von Staubscheiben umgeben sind. Der Staub macht sich bei Wellenlängen jenseits von 3 μm bemerkbar.

fig. Dabei werden große Mengen an feinem Staub freigesetzt, der nahe am Stern Infrarotstrahlung emittiert. Ob mit SPITZER diese »zweite Staubgeneration« beobachtet wurde, oder noch das ursprüngliche Material, lässt sich nicht entscheiden. Weitere Beobachtungen an Sternen im Altersbereich bis etwa 100 Millionen Jahre könnten hierüber Aufschlüsse geben.

Kuiper-Ringe bei sonnenähnlichen Sternen

Wenn sich in einer protoplanetaren Scheibe größere Körper wie Planetesimale oder Planeten gebildet haben, verschwindet rasch der übrige Staub. Sehr kleine Teilchen bis zu 1 μm Durchmesser werden vom Strahlungsdruck innerhalb einiger hundert Jahre aus dem System herausgeblasen. Größere Teilchen werden durch den so genannten Poynting-Robertson-Effekt gebremst und fallen in den Stern hinein. (Dieser Effekt beruht darauf, dass auf ein Teilchen auf seiner Umlaufbahn ein Netto-Strahlungsdruck entgegen der Flugrichtung ausgeübt wird. Dadurch verliert es Energie und bewegt sich auf einer Spiralbahn auf den Zentralstern zu.) Staubkörnern bis zu 10 μm Größe verbleiben deshalb nicht länger als einige Millionen Jahre im System. Wenn auch ältere Sterne, wie die Sonne, von Staub umgeben sind, so muss dieser ständig nachgeliefert werden. Dies geschieht, wie erwähnt, durch Zusammenstöße von Planetoiden.

In unserem Sonnensystem gibt es zwei bedeutende Staubbzonen – den Asteroidengürtel zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter, sowie den Kuiper-Ring jenseits der Neptun-Bahn, in etwa 30 bis 50 AE Abstand von der Sonne. Nur bei sehr wenigen, nahen und leuchtkräftigen Sternen, wie Beta Pictoris oder Wega, konnten solche Staubscheiben nachgewiesen werden. Mit SPITZER entdeckten die Astronomen bei mehreren sonnenähnlichen Sternen Staub, der sich wahrscheinlich in einem dem Kuiper-Ring vergleichbaren Bereich befindet.

Es standen photometrische Messdaten bis zu 70 μm Wellenlänge und spektroskopische Daten mit geringer spektraler Auflösung im Bereich von 5.2 μm bis zu 38 μm zur Verfügung. Insgesamt fanden sich bei sieben Sternen deutliche Hinweise auf kühlen Staub, der sich vor allem durch eine signifikante Emission bei 70 μm verriet (vgl. Abb. II.2.5). Sechs von ihnen sind sonnenähnliche Hauptreihensterne deren Alter zwischen einer und drei Milliarden Jahren liegt. Nur einer von ihnen, HD 105, ist mit etwa 30 Millionen Jahren erheblich jünger.

Aus diesen Messdaten allein lässt sich die Scheibe nicht eindeutig modellieren. Es fehlen Informationen über die chemische Beschaffenheit der Staubkörner und vor allem auch über deren Größenverteilung. Auf jeden Fall aber besitzt die Scheibe von HD 105 ein großes zentrales Loch. Nimmt man beispielsweise an, dass die Körner 5 bis 1000 μm groß sind und aus Silikat und Graphit bestehen, so ergibt sich ein innerer Radius der Scheibe von 45 AE. Je kleiner die kleinsten Teilchen sind, desto weiter wandert der Innenrand vom Stern weg. Auch für die anderen, wesentlich älteren Hauptreihensterne passen die Daten am besten zu Modellen, in denen die Scheiben ein zentrales Loch mit Radien zwischen 20 und 50 AE aufweisen.

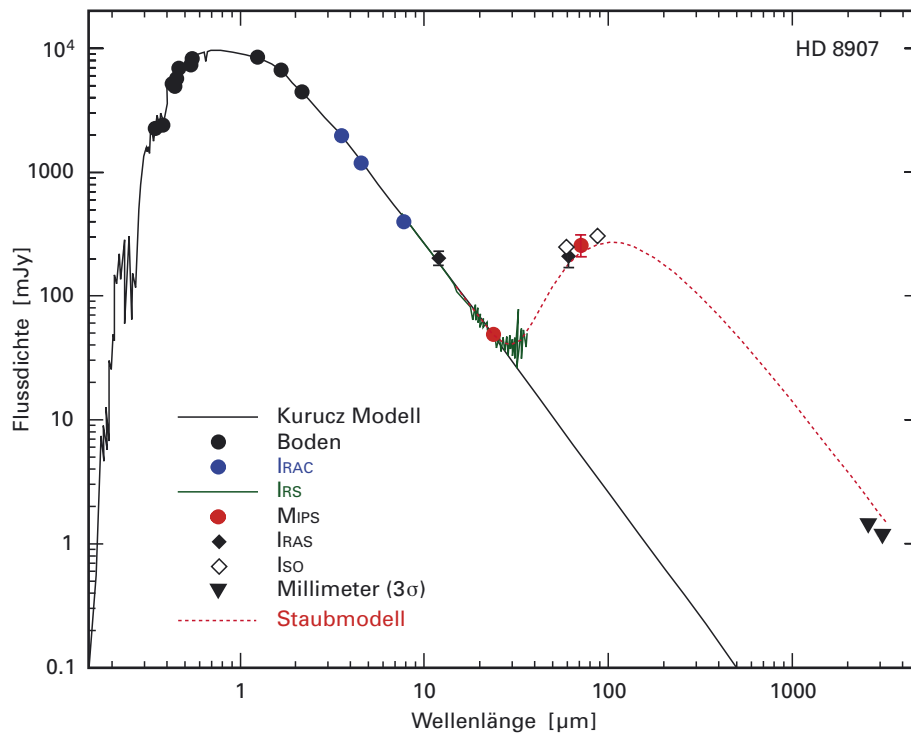


Abb. II.2.5: Die spektrale Energieverteilung des Sterns HD 8907. Die starke Emission im mittleren und fernen Infrarot stammt von einer kühlen Staubscheibe.

Wie lässt sich die zentrale Öffnung in den Scheiben erklären? Sublimation der Staubteilchen oder der Poynting-Robertson-Effekt sind nicht sehr wahrscheinlich. Die einfachste Erklärung lautet: Es gibt einen oder mehrere große Planeten, die ihren Zentralstern in einem Abstandsbereich von 10 bis 20 AE umkreisen und ihre Umgebung mit ihrer Schwerkraft »staubfrei« halten. Jenseits der Planetenbahnen sollte sich ein Planetoidengürtel ähnlich dem Kuiper-Ring erstrecken, in dem kollidierende Körper Staub nachliefern.

Wie vergleichen sich nun die beobachteten Staubscheiben quantitativ mit unserem Kuiper-Ring? Die Scheibe um den Stern HD 105 beinhaltet eine Masse um 10^{-7} Sonnenmassen, bei den anderen, älteren Sternen liegen die Werte im Allgemeinen typischerweise bei nur 10^{-10} Sonnenmassen. Schätzungen haben ergeben, dass die Staubteilchen im Kuiper-Ring insgesamt etwa 10^{-11} Sonnenmassen beinhalten. Das ist weniger als in den betrachteten Sternen. Allerdings ist unser Sonnensystem älter als die beobachteten Objekte. Entwicklungsmodelle des Kuiper-Rings legen nahe, dass die Staubmasse im Laufe der Zeit beispielsweise wegen der Bildung großer Planetoiden abgenommen hat. Insofern könnten die Staubringe der beobachteten Sterne durchaus sehr ähnliche Eigenschaften besitzen wie der Kuiper-Ring in unserem Sonnensystem vor vielleicht zwei Milliarden Jahren.

Als besonders interessant erwies sich ein Objekt mit der Bezeichnung HD 12039. Dieser sonnenähnliche, etwa 30 Millionen Jahre alte Stern besitzt bei 14 µm bis 40 µm Wellenlänge einen starken Infrarotexzess, ist jedoch bei 70 µm nicht nachweisbar. Die Beobachtungsdaten lassen sich am besten mit einem dünnen Staubring deuten, der den Stern zwischen vier AE und sechs AE Abstand umgibt und dessen Teilchen vorwiegend zwischen 3 und 10 µm groß sind. Damit erinnert HD 12039 an den Asteroidengürtel in unserem Sonnensystem. Und auch dort könnte die Staubscheibe ein Hinweis auf unsichtbare Planeten sein.

Sind die Modelle für HD 12039 richtig, so sollte sich die Scheibe des 140 Lichtjahre entfernten Sterns mit hoch auflösenden Instrumenten, wie NICMOS an Bord des Weltraumteleskops HUBBLE, oder mit adaptiv optischen Systemen wie NACO am VLT, beobachten lassen. Diese Aufnahmen könnten weitere Aufschlüsse darüber geben, ob HD 12039 von einem Planeten umkreist wird.

(Jeroen Bouwman, Thomas Henning, Jens Rodmann, Sebastian Wolf. Beteiligte Institute in den USA: Steward Observatory, The University of Arizona, California Institute of Technology, Pasadena, NASA-Ames Research Center, Moffet Field, Space Telescope Science Institute, Baltimore, University of California, Berkeley, Space Science Institute, Boulder, Lunar Planetary Lab, The University of Arizona, Tucson, SPITZER Science Center, Caltech, Pasadena, National Optical Astronomy Observatory, Tucson, Univ. of Rochester, Rochester, Planetary Science Institute, Tucson, Johns Hopkins University, Baltimore, Princeton University, Princeton, Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge.)

II.3 Rätselhafter Sternenstaub im frühen Universum

Im Jahre 2003 war es gelungen, in den entferntesten Quasaren große Staubmengen nachzuweisen. Damit stellte sich die Frage, auf welche Weise der Staub innerhalb von nur etwa 700 Millionen Jahren seit dem Urknall entstanden sein konnte. Schon bald schien das Rätsel gelöst: Ein Astronomenteam behauptete, in dem Supernova-Überrest Cassiopeia A (Cas A) außerordentlich viel Staub nachgewiesen zu haben. Die Forscher schlossen daraus, dass Supernovae vom Typ II die ersten Staublieferten im All waren. Astronomen des MPIA gingen der Sache nach und kamen zu einem anderen Schluss: Der bei Cas A gefundene Staub hat nichts mit dem Supernova-Überrest zu tun, denn er gehört in Wirklichkeit zu einem großräumigen Staubkomplex, der zwischen der Erde und Cas A liegt. Damit ist die Frage nach dem Ursprung des Staubes im jungen Universum weiterhin offen.

Staub spielt im Universum eine entscheidende Rolle, denn er ist der Rohstoff, aus dem laufend Sterne und Planeten entstehen. Die festen Partikel können sich jedoch nur bilden, wenn schwere Elemente, vor allem Kohlenstoff, vorliegen. Nach der derzeitigen angenommenen Kosmologie sind im Urknall nur die leichten, flüchtigen Elemente Wasserstoff und Helium sowie in geringen Mengen Lithium und Beryllium entstanden. Alle schwereren Stoffe wurden erst im Innern der Sterne bei Kernfusionsreaktionen gebildet. Sie wurden später bei Supernova-Explosionen oder mit Sternwinden in den interstellaren Raum getragen.

Erst nachdem das interstellare Medium auf diese Weise mit schweren Elementen angereichert war, konnte sich auch Staub bilden, und erst jetzt waren auch die Voraussetzungen für Planetenbildung gegeben. Wie Beobachtungen aus den letzten beiden Jahren belegen, gab es spätestens 700 Millionen Jahre nach dem Urknall große Mengen Staub. So fand man etwa hundert Millionen Sonnenmassen Staub in den am weitesten entfernten bekannten Quasaren. Wie waren diese gewaltigen Staubmengen in so kurzer Zeit entstanden?

Als frühe Staubquellen kamen Supernova-Explosionen in Frage. Die Sterne der ersten Generation bestanden nur aus Wasserstoff und Helium und waren deshalb im Mittel wesentlich massereicher als heutige Sterne. Massereiche Sterne explodieren als Supernovae, und in ihren Explosionshüllen könnte sich, so die Vermutung, Staub bilden. Doch sind Supernovae wirklich ergiebige Staublieferten? Bislang galten Supernova-Überreste als staubarm, da sich in ihnen im kurzwelligen Infrarotbereich nur wenig warmer Staub nachweisen ließ. Mit einer Beobachtung im Jahr 2003 schien sich das zu ändern.

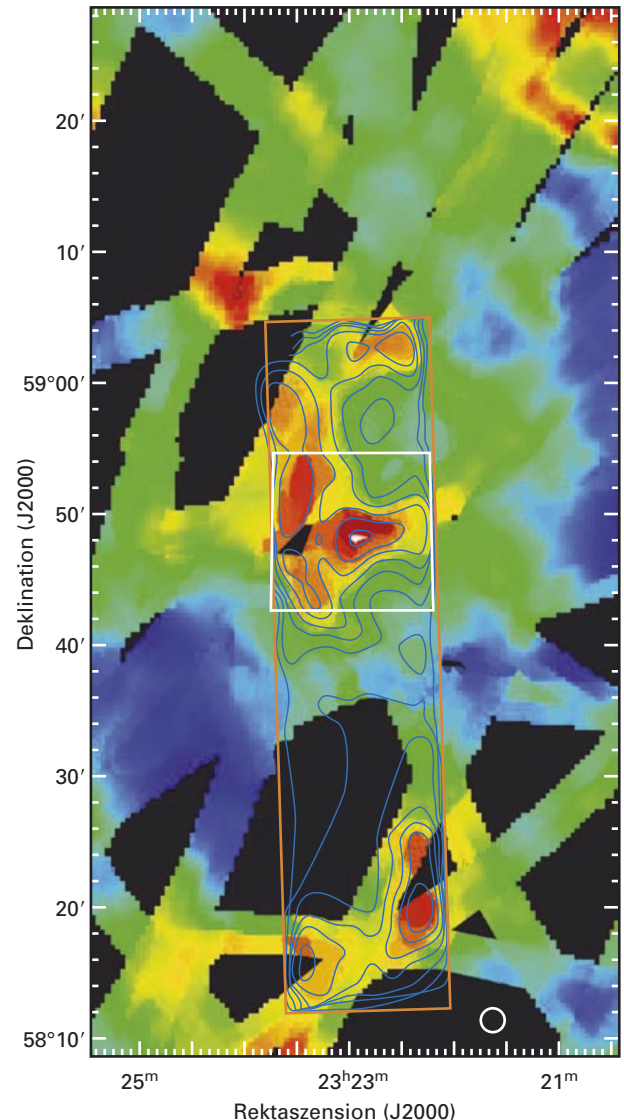


Abb. II.3.1: Die Umgebung von Cas A, gesehen in der ISOPHOT-Zufallsdurchmusterung bei einer Wellenlänge von 170 μm . Hier ist die Emission sehr kalten Staubes zu erkennen. Cas A (im Zentrum) wird offensichtlich von einer ausgedehnten Staubbewölke im Vordergrund überdeckt. Die Konturen innerhalb des weißen Rechtecks zeigen Messungen von SPITZER bei 160 μm , die mit den ISO-Messungen sehr gut übereinstimmen.

Ein britisches Team hatte Cas A im Submillimeterbereich untersucht und starke Emission im Bereich des Supernova-Überrests gefunden. Diese sollte von kühlem Staub mit der erstaunlich großen Masse von drei Sonnenmassen stammen, was einem großen Teil der Gesamtmasse des kollabierenden Vorgängersterns entsprechen würde. Das

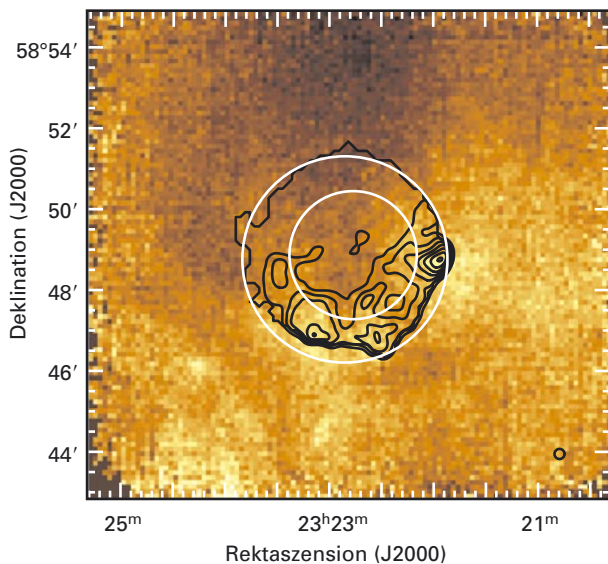


Abb. II.3.2: Verteilung von OH-Gas in der unmittelbaren Umgebung von Cas A. Der gezeigte Bereich entspricht dem weißen Rechteck in Abb. II.3.1. Da die OH-Wolke in Absorption gegen die helle Radioquelle Cas A gemessen wurde, muss die interstellare Wolke im Vordergrund des Supernova-Überrests liegen.

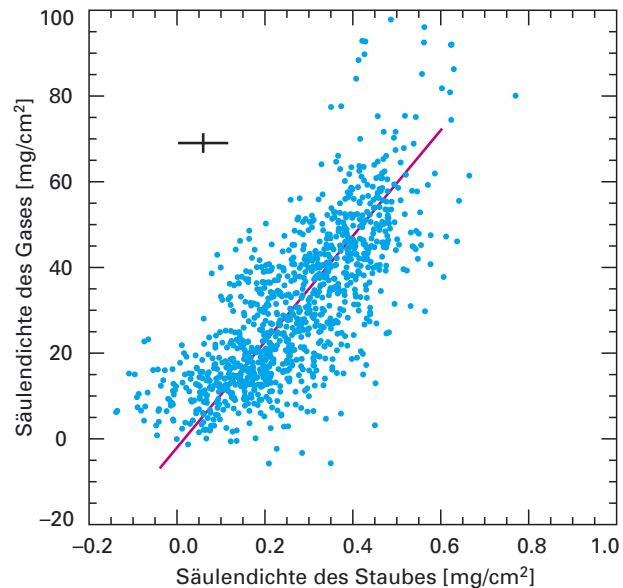


Abb. II.3.3: Eine Korrelation von Gas- und Staubbichte, ermittelt aus der Säulendichte des OH-Moleküls und des Submillimeterflusses der thermischen Emission des Staubes. Das gefundene Verhältnis von Gas zu Staub ist typisch für unser Milchstraßensystem.

Fazit war: Anscheinend produzierten Supernovae vom Typ II, zu denen die Supernova in Cas A gehört, tatsächlich genügend viel Staub, um damit die Anreicherung im frühen Universum zu erklären.

Doch schon ein Jahr später wurde diese Schlussfolgerung widerlegt. Astronomen des MPIA vermuteten, dass es den Staub zwar gibt, dass dieser jedoch weit vor Cas A liegt und mit dem Objekt nichts zu tun hat. Es ist seit langem bekannt, dass Cas A etwa 11 000 Lichtjahre entfernt jenseits des staubreichen Perseus-Spiralarms steht. Vermutlich waren vorgelagerte Staubwolken auch dafür verantwortlich, dass um 1680 kein irdischer Astronom die Supernova-Explosion beobachtete. Cas A steht nämlich der Erde so nahe, dass die Supernova für einige Zeit als der hellste Stern am ganzen Himmel hätte erscheinen müssen. Dichte Staubwolken im Perseus-Arm verhinderten dies aber. Es lag daher nahe, dass die neu entdeckte Emission im Submillimeterbereich von jenem vorgelagerten Staub stammt, und nicht von Cas A selbst.

Um diese Hypothese zu überprüfen, werteten die Astronomen des Instituts zunächst Infrarotdaten aus, die sie im Archiv des Infrarotsatelliten ISO fanden. Mit ISO war das Gebiet um Cas A im Rahmen der so genannten Zufallsdurchmusterung im fernen Infraroten bei einer Wellenlänge um $170\ \mu\text{m}$ beobachtet worden (Abb. II.3.1). In diesem Bereich emittiert sehr kalter Staub mit Temperaturen zwischen 10 und 20 Kelvin, entsprechend -250 bis $-260\ ^\circ\text{C}$. Auf der ISO-Karte zeigten sich drei Emissionsgebiete, die in ihrer Lage und Ausdehnung sehr genau mit der im Submillimeterbereich gefundenen Emission übereinstimmten. Der hierfür verantwortliche

Staub hat eine Temperatur von 14 K, ein typischer Wert für Dunkelwolken.

Interessanterweise hatte man schon früher aus dem Gebiet dieser Staubwolke molekulares Gas nachgewiesen (Abb. II.3.2). Da dieses Gas in Absorption gegen die helle Radiostrahlung von Cas A detektiert wurde, muss es sich zwischen der Erde und dem Supernova-Überrest befinden. Aufgrund seiner gemessenen Kinematik kann es dem Perseus-Arm zugerechnet werden. Aus der Säulendichte des OH-Moleküls und des Submillimeterflusses ergab sich auch eine gute Korrelation von Gas und Staub. Fazit: Das gefundene Verhältnis von Gas zu Staub ist typisch für unsere galaktische Umgebung (Abb. II.3.3).

Aus dem quantitativen Vergleich der Verteilung dieses Gases mit der Staubbemission ergibt sich, dass der in den interstellaren Wolken vorhandene Staub praktisch für die gesamte Strahlung im Infrarot- und Submillimeterbereich verantwortlich ist. In diese Analyse wurden neue Beobachtungen von Cas A mit dem weltraumgestützten Infrarotteleskop SPITZER einbezogen. Dafür nutzten die Astronomen des Instituts gemeinsam mit Kollegen vom Steward Observatory in Tucson, Arizona, und dem Space Science Institute in Boulder, Colorado, das abbildende Photometer bei $160\ \mu\text{m}$ Wellenlänge. Tatsächlich erstrecken sich die im Infraroten nachgewiesenen Staubwolken sogar weit über die Grenzen des Supernova-Überrestes hinaus. Es gibt also keine wesentlichen Mengen Staubes, die direkt mit dem Supernova-Überrest Cas A assoziiert sind (Abb. II.3.4).

Damit ist die Frage nach den ersten Staubquellen im Kosmos wieder offen. Sie ist eng verknüpft mit der Suche

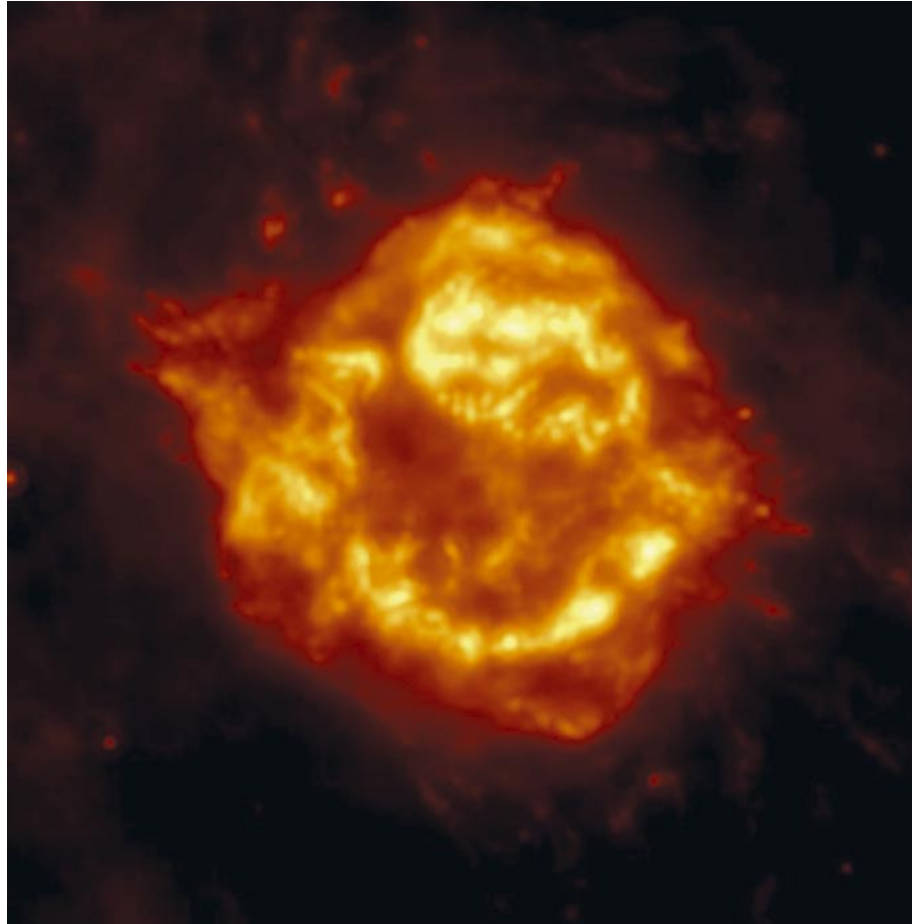


Abb. II.3.4: Der Supernova-Überrest Cassiopeia A, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop SPITZER bei 24 μm Wellenlänge. Dieses Infrarotbild zeigt die Emission des von der Superno-

va erzeugten warmen Staubes, dessen Gesamtmasse nur 0.002 Sonnenmassen beträgt. (JPL/NASA/O. Krause, University of Arizona)

nach der ersten Sternengeneration, von der bislang noch keine Anzeichen gefunden wurden. Die Suche nach ihr gehört zu den vordringlichen Aufgaben der Astrophysik. Zukünftige Weltraumteleskope, wie HERSCHEL oder PLANCK, sollen hier neue Aufschlüsse erbringen.

*(Oliver Krause, Stephan M. Birkmann,
Dietrich Lemke, Ulrich Klaas.*

*Beteiligte Institute:
Steward Observatory, Tucson Arizona,
Space Science Institute, Boulder, Colorado)*

II.4 Der Monoceros-Gezeitenstrom in unserem Milchstraßensystem

Vor drei Jahren fand sich in den Daten des Sloan Digital Sky Survey eine ringförmige Struktur, die sich am Himmel über etwa 100° erstreckt. Hierbei handelt es sich um einen Gezeitenstrom von Sternen, die aus einer Zwerggalaxie herausgerissen wurden, während diese mit unserer Galaxis verschmolz. Astronomen des MPIA konstruierten aus allen verfügbaren Beobachtungsdaten ein umfangreiches Modell dieses so genannten Monoceros-Stroms und konnten so auch Aussagen über die vermutete Zugehörigkeit von Kugelsternhaufen und anderen Sterngruppierungen zu diesem Gezeitenstrom gewinnen.

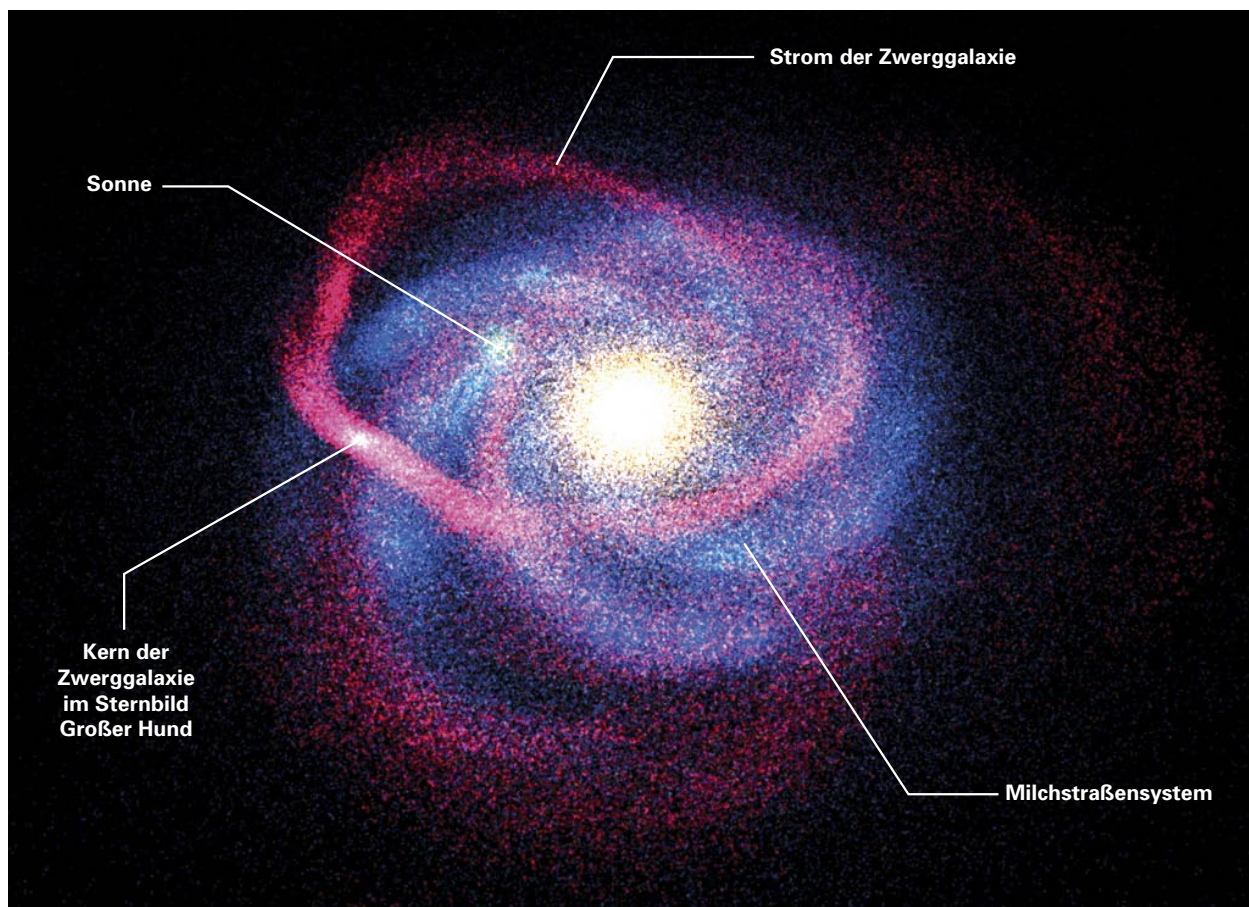
In modernen kosmologischen Theorien geht man davon aus, dass die heutigen großen Galaxien durch Verschmelzen kleinerer Galaxien angewachsen sind. Auch in der kosmologisch jüngeren Vergangenheit von einigen Milliarden Jahren kam es wahrscheinlich immer wieder vor, dass Satellitengalaxien in ihre großen Zentralgalaxien eintauchten und sich darin auflösten. Durch Wechselwirkung mit dem Gravitationspotential der

großen Galaxie können die Sterne der Satellitengalaxie vermutlich bis in die Scheibe einer Spiralgalaxie absinken und die dortige Sternpopulation erheblich vergrößern.

Auch heute noch kann man die »fossilen« Überreste solcher Verschmelzungsvorgänge in unserem Milchstraßensystem nachweisen. Das bekannteste Beispiel ist die Sagittarius-Zwerggalaxie, deren Gezeitenstrom sich gänzlich um das Zentrum des Milchstraßensystems windet.

Zehn Jahre lang blieb dies das einzige Beispiel für das Verschmelzen einer Satellitengalaxie mit unserer Galaxis, bis im Jahr 2002 in den Daten des Sloan Digital Sky Survey eine ringförmige Struktur entdeckt wurde, die sich über etwa 100° am Himmel erstreckt. Benannt wurde dieser Sternstrom nach dem zentralen Sternbild Monoceros. Dieser Strom windet sich zweimal um das Zentrum des Milchstraßensystems und enthält vorwiegend metallarme Sterne. Abb. II.4.1 zeigt eine qualitative Graphik.

Abb. II.4.1: Schematische Darstellung des Monoceros-Gezeitenstroms.



Über den Monoceros-Strom ist weit weniger bekannt als über den Sagittarius-Strom. Ein Grund hierfür ist die Tatsache, dass er großteils in der galaktischen Ebene liegt, wo Staub das Licht der Sterne absorbiert. Der Abstand des Stroms zum Galaktischen Zentrum ließ sich bislang nur grob zwischen 15 und 20 kpc (50 000 und 65 000 Lj) eingrenzen, auch die eigentliche Quelle des Stroms ist bislang nicht zweifelsfrei identifiziert. Vermutet wird eine Zwerggalaxie im Sternbild Canis Major. Sie ist insbesondere an einer Überdichte von über 60 M-Riesensternen in einem elliptischen Gebiet erkennbar. Abb. II.4.2 verdeutlicht die Lage dieser Zwerggalaxie nahe der galaktischen Ebene.

Im Umfeld der Canis-Major-Zwerggalaxie (CMA-Zwerggalaxie) befinden sich zudem vier Kugelsternhaufen, die dieselbe Radialgeschwindigkeit besitzen wie die CMA-Zwerggalaxie. Es wurde daher schon früh vermutet, dass diese Objekte beim Eindringen in die Galaxis eine gemeinsame Gruppe bildeten. Zudem wurde im Jahr 2004 ein weiterer schwer erkennbarer Sternstrom entdeckt. Dieser nach seiner Lage in den Sternbildern Triangulum und Andromeda benannte Tri/And-Strom könnte Teil des Monoceros-Stroms sein.

Astronomen des Instituts erstellten anhand der verfügbaren Beobachtungsdaten ein räumliches Modell des Monoceros-Gezeitenstroms mit dem Ziel, zunächst einmal dessen Kinematik und Dynamik zu bestimmen,

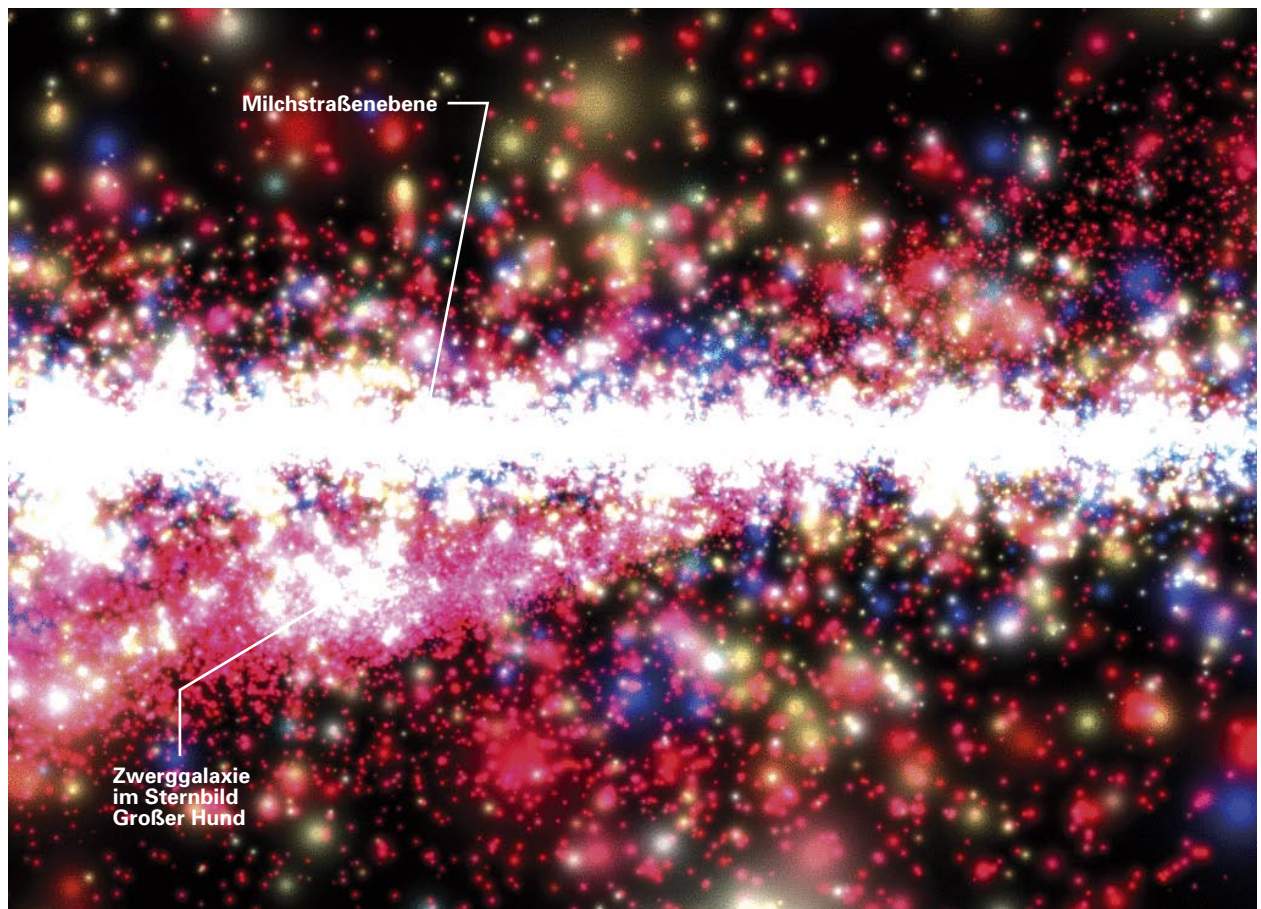
und daraus den Auflösungsvorgang zu rekonstruieren. Darüber hinaus sollten die mutmaßliche Ursprungsgalaxie eindeutig identifiziert und die erwähnten möglichen Mitglieder untersucht werden.

Beobachtungsdaten und Modell des Monoceros-Gezeitenstroms

Es gibt mehrere Kriterien, um die Zugehörigkeit von Sternen zu einem gemeinsamen Strom zu ermitteln. Photometrisch lässt sich eine Überhäufigkeit eines bestimmten Sterntyps erkennen, Gemeinsamkeiten lassen sich ebenso bei Elementhäufigkeiten, Radialgeschwindigkeiten und Eigenbewegungen feststellen. Solche Beobachtungsdaten wurden in dem Modell verwendet. In ihm wird das Milchstraßensystem in drei Komponenten aufgeteilt: Halo aus Dunkler Materie, Scheibe und zentraler Bulge. Für diese Bereiche werden Gravitationspotentiale entworfen, in denen sich dann die Zwerggalaxie bewegt.

Es hätte zu viel Rechenzeit benötigt, um alle denkbaren Szenarien in einem großen Bereich der physikalischen

Abb. II.4.2: Die Lage der Canis-Major-Zwerggalaxie unmittelbar unterhalb der galaktischen Ebene.



Parameter (beispielsweise Abstand vom Galaktischen Zentrum und Neigung zur galaktischen Ebene) vollständig numerisch zu simulieren. Daher arbeiteten die Theoretiker in einem ersten Schritt ein halb analytisches Modell aus und grenzten damit den möglichen Parameterbereich ein, in dem dann vollständige numerische Modelle gerechnet wurden.

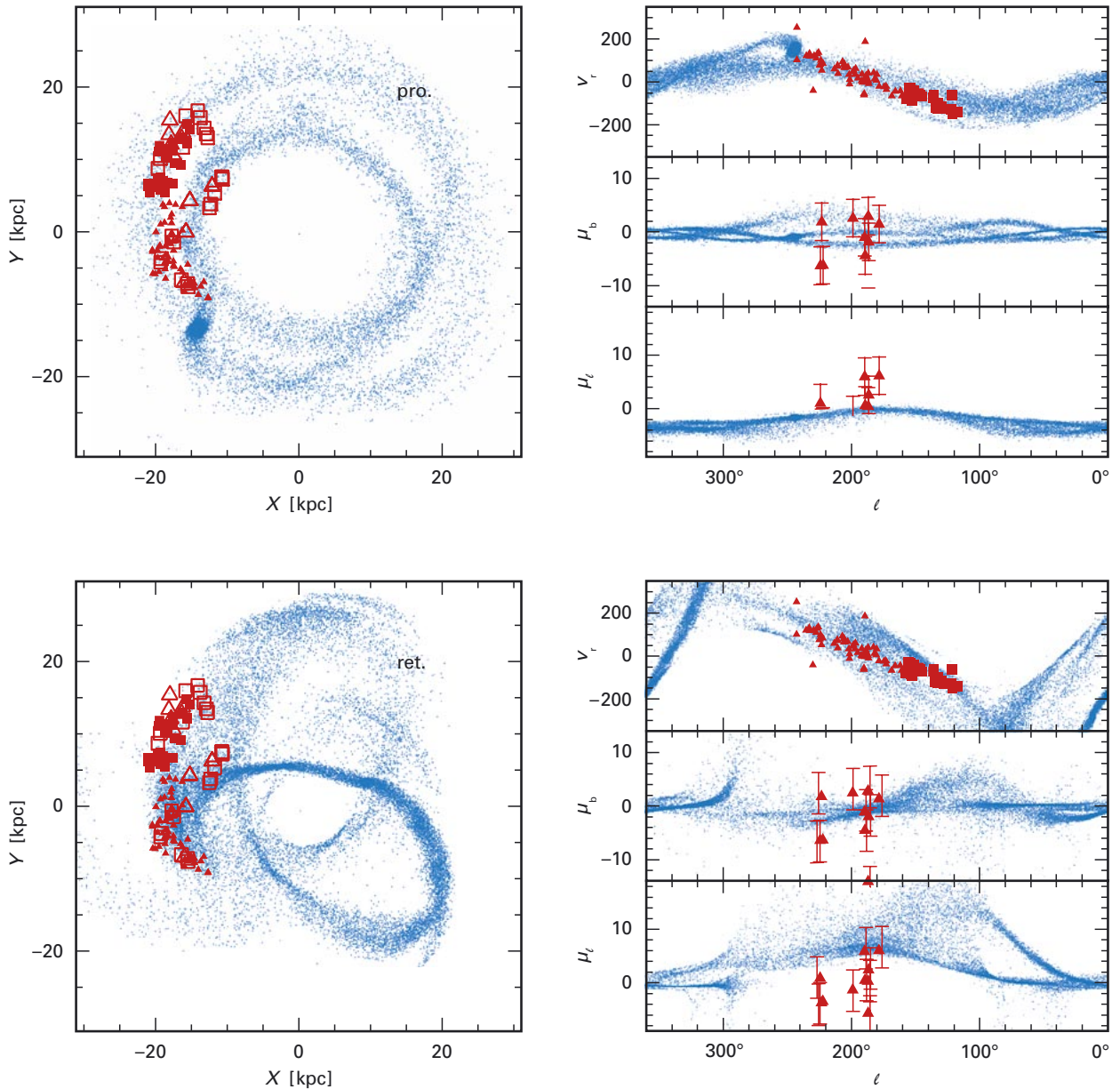
Darin stellten sie die drei Komponenten der Galaxis mit insgesamt 1.3 Millionen Teilchen und die Zwerggalaxie mit 100 000 Teilchen dar. Dann verfolgten sie die Bewegung der Zwerggalaxie im Potential des Milch-

straßensystems über einen Zeitraum von drei Milliarden Jahren hinweg. Hierbei variierten sie die Parameter und suchten nach jenen Lösungen, welche die Messdaten am besten wiedergaben.

Als erstes gingen sie der Frage nach, in welcher Richtung sich die Sterne des Monoceros-Stroms um das Galaktische Zentrum bewegen. Hier gaben erst die Eigenbewegungen in galaktischer Länge μ_ℓ den eindeutigen Ausschlag für einen prograden Umlauf (Abb. II.4.3). Lediglich die Daten von zwei Sternen fügen sich nicht in das Modell. Alle folgenden Modelle gingen deshalb von einem prograden Umlauf aus.

In Abb. II.4.3 erkennt man deutlich, dass der Monoceros-Strom aus zwei nahezu konzentrischen Ringen mit Radien von etwa 12 kpc (40 000 Lj) und 22 kpc (70 000 Lj) besteht. Die beiden Ringe sind um etwa 25° gegen die galaktische Ebene geneigt. Diese ungewöhn-

Abb. II.4.3: Modelle und Messdaten für den Monoceros-Strom – oben für prograden, unten für retrograden Umlauf. Erst die Eigenbewegungen in galaktischer Länge μ_ℓ geben den Ausschlag für die prograden Bahnen.



liche Form könnte auf einen anisotropen Massenverlust der Zwerggalaxie beim Durchqueren der Galaxis zurückzuführen sein.

Mit dem besten Modell des Stroms (prograder Umlauf) gingen die Astronomen der Frage nach, ob die CMa-Zwerggalaxie wirklich der Ursprung dieses Stromes ist. Da die Zwerggalaxie nahe der galaktischen Ebene liegt, lässt sie sich nur schwer beobachten. Ihre Masse wurde von verschiedenen Astronomen nur ungenau zwischen 10^8 und 10^9 Sonnenmassen und die Entfernung zu 7.2 kpc (24 000 Lj) geschätzt. Mit Hilfe der verfügbaren Radialgeschwindigkeiten und Eigenbewegungen der M-Überriesen in der Zwerggalaxie wurde die Bahn der CMa-Zwerggalaxie zeitlich zurück berechnet und anschließend mit dem Modell verglichen. Das Ergebnis bestätigte die Vermutung, dass die CMa-Zwerggalaxie der Ursprung des Monoceros-Stroms ist. Die bestmögliche Übereinstimmung ergab sich für eine große Anfangsmasse von 1.8×10^9 Sonnenmassen.

Interessant war nun die Frage, ob auch die Kugelsternhaufen, die einige Astronomen der CMa-Zwerggalaxie zurechnen, in das Modell passen. Die Analyse ergab, dass dies nicht der Fall ist. Zwei der Kugelsternhaufen (NGC 1851 und NGC 1904) haben zu große Radialgeschwindigkeiten, und ihre Bahnen sind wesentlich exzentrischer als die des Monoceros-Stroms. Der dritte Haufen (NGC 2298) bewegt sich sogar auf einer stark exzentrischen, retrograden Bahn um das Galaktische Zentrum. Für den vierten Kugelsternhaufen lagen keine Eigenbewegungen

vor. Es gibt aber noch weitere Sternhaufen, die eventuell der CMa-Zwerggalaxie zugerechnet werden könnten. Ob dies der Fall ist, lässt sich erst entscheiden, wenn von diesen Objekten Eigenbewegungen vorliegen.

Eine mögliche Zugehörigkeit zum Monoceros-Strom lieferte das Modell jedoch für den erst kürzlich entdeckten Tri/And-Strom. Dessen Kinematik spricht dafür, dass er sich von 120 bis 150° galaktischer Länge an den Monoceros-Strom anschließt. Er könnte sogar eine Verbindung zu einem weiteren Sternstrom bilden, der sich von 110 bis 140° Länge erstreckt und ebenfalls erst kürzlich in den Daten des Sloan-Surveys entdeckt wurde. Der gesamte Strom würde somit über einen Bereich von 110 bis 240° Länge sichtbar sein.

Zukünftige Messungen, vor allem von Eigenbewegungen, sollten es ermöglichen, das räumliche und kinematische Modell weiter zu verbessern. Dann wäre es möglich, die vergangene Entwicklung der CMa-Zwerggalaxie zu rekonstruieren, nachdem diese in unser Milchstraßensystem eingedrungen ist und sich nun darin auflöst.

*(Jorge Penarrubia, David Martinez-Delgado,
Hans-Walter Rix, Eric F. Bell, Daniel Zucker.
Beteiligte Institute: Europäische Universität Madrid,
Spanien, US Naval Observatory, Flagstaff, USA,
Rensselaer Polytechnical Institute, Troy, USA,
Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia,
USA, Universität Basel, Schweiz)*

II.5 Staub und Gas im entferntesten Quasar

Der entfernteste bekannte Quasar mit der Bezeichnung J1148+5251 besitzt eine Rotverschiebung $z=6.42$. Das heute von ihm empfangene Licht sandte er aus, als das Universum etwa 870 Millionen Jahre alt war. Im vergangenen Jahr gelang es mit dem Very Large Array, große Mengen an Kohlenmonoxid-Gas in diesem Objekt nachzuweisen. Dieser Befund wirft ein neues Licht auf die Erzeugung schwerer Elemente im jungen Universum und liefert neuen Diskussionsstoff zu der Frage, was zuerst da war: die Galaxien oder ihre zentralen Schwarzen Löcher.

Der Himmelskörper mit der Katalogbezeichnung J1148+5251 wurde Anfang 2003 in den Daten der Himmelsdurchmusterung Sloan Digital Sky Survey (SDSS) entdeckt. Der im April 2000 begonnene SDSS, für den auf dem Apache Point in New Mexico eigens ein 2,5-Meter-Teleskop gebaut wurde, ist die bislang umfangreichste digitale Himmelsdurchmusterung. Das Projekt wird von einem Konsortium amerikanischer, japanischer und deutscher Institute durchgeführt. Auf deutscher Seite sind das MPIA und das MPI für Astrophysik in Garching als Partnerinstitute beteiligt.

Die Quelle J1148+5251 fiel in den SDSS-Daten wegen ihrer roten Farbe auf. Weitere Aufnahmen und

spektroskopische Nachbeobachtungen mit dem Keck-Teleskop bestätigten die Vermutung, dass es sich um einen sehr weit entfernten Quasar handelt (Abb. II.5.1). Mit einer Rotverschiebung $z=6.42$ ist er sogar der derzeitige Rekordhalter. Zusammen mit einer Handvoll weiterer Quasare gehört er zu jenen Objekten, die wir in der Übergangszeit von der »dunklen«, neutralen Ära zur Ära der Re-Ionisation beobachten.

Nach dem derzeit angenommenen kosmologischen Modell kühlte sich das Gas nach dem Urknall ab und wurde nach etwa 300 000 Jahren neutral (Abb. II.5.2). Anschließend entstanden die ersten Sterne und Quasare, die nun mit ihrer UV-Strahlung das sie umgebende Medium ionisierten. Zunächst glich das Universum einem Schweizer Käse, in dem sich innerhalb des neutralen Gases »Löcher« ionisierten Plasmas befanden. Diese Blasen dehnten sich aus, bis schließlich das gesamte Medium ionisiert war. Diese Phase endete nach heutigem Wissen knapp eine Milliarde Jahre nach dem Urknall.

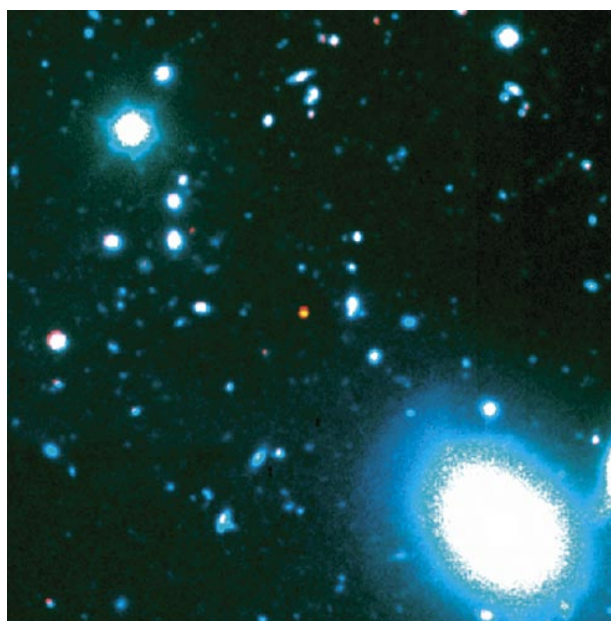
Der Quasar J1148+5251 hat um sich herum eine Plasmablase mit 9,6 Mpc (30 Millionen Lichtjahren) Durchmesser geschaffen, wie sich aus seinem Spektrum ableiten lässt. Aus der Größe dieser Blase kann man schließen, dass die Quasaraktivität bis dahin etwa zehn Millionen Jahre angedauert hat. Die Strahlung stammt aus einer heißen Gasscheibe (Akkretionsscheibe), die ein zentrales Schwarzes Loch mit ein bis fünf Milliarden Sonnenmassen umgibt. Man sieht hier also ein Objekt, das gerade dabei ist, seine Umgebung zu ionisieren.

J1148+5251 ist auch in anderer Hinsicht bemerkenswert. Radioastronomen hatten mit dem Radioteleskop IRAM auf dem Pico Veleta in Südspanien große Mengen Staub nachgewiesen. Unter der Annahme, dass der Staub überwiegend von jungen Sternen erwärmt wird, errechnet man eine Sternentstehungsrate von etwa 3000 Sonnenmassen pro Jahr, oder alle fünf Stunden ein neuer Stern. Diese Rate ist rund tausendmal so hoch wie heute in unserem Milchstraßensystem.

Bemerkenswert ist auch, dass bereits in dieser frühen Phase des Universums schon große Mengen an schweren Elementen vorhanden waren. Denn ohne sie könnte sich kein Staub bilden. Da Kohlenstoff, Sauerstoff und die Elemente, aus denen sich der kosmische Staub zusammensetzt, erst durch Kernfusionen im Inneren der Sterne entstehen, muss die Anreicherung des interstellaren Gases mit schweren Elementen ungewöhnlich schnell erfolgt sein. Auf welche Weise dies geschah, durch Supernovae und/oder durch Winde massereicher Sterne, ist noch ungeklärt (s. Kap. II.3).

Beobachtungen mit dem Very Large Array in Socorro, New Mexico, brachten weitere spektakuläre Ergebnisse.

Abb. II.5.1: In einer Aufnahme mit dem Keck-Teleskop macht sich der Quasar J1148+5251 durch seine rote Farbe bemerkbar. (S. Djorgovski, Keck)



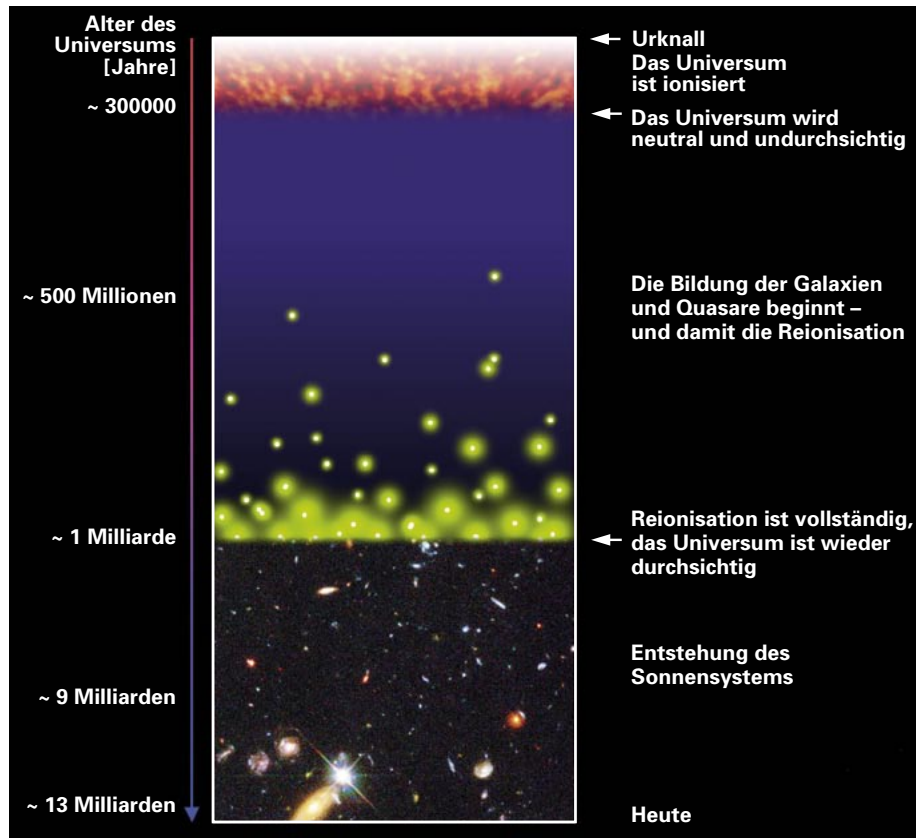
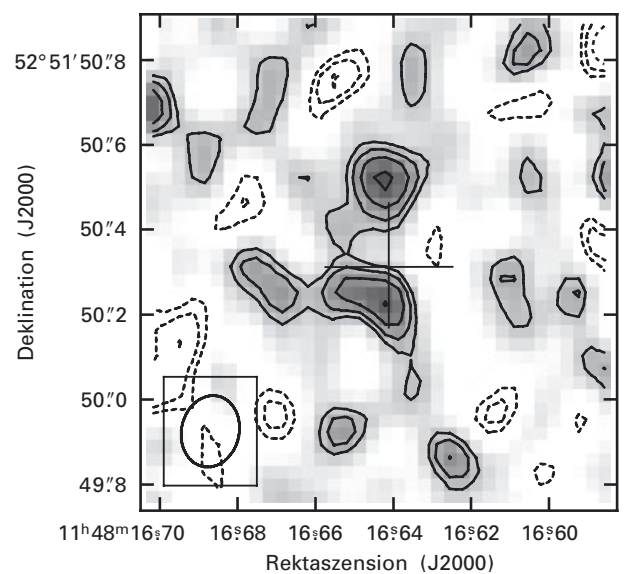
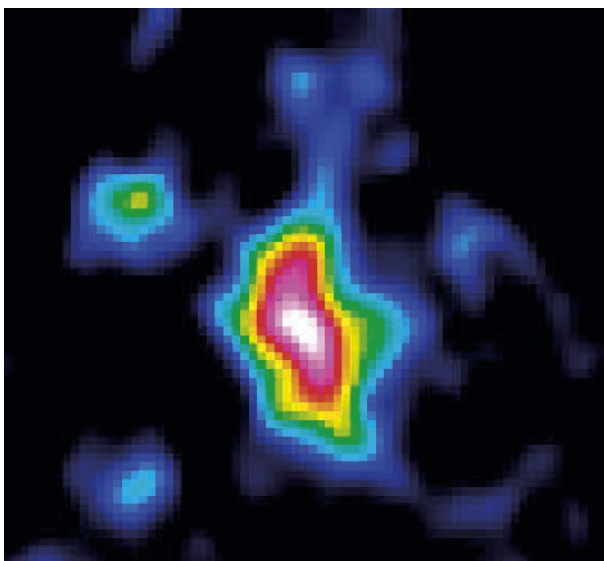


Abb. II.5.2: Die Entwicklungsphasen des Universums. Die Reionisierung setzte einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall ein. (S. Djorgovski)

Abb. II.5.3: Aufnahme des Quasars J1148+5251 mit dem VLA. In der Konturaufnahme ist zusätzlich die Position des optisch sichtbaren Kerns eingetragen.

Bei einer Auflösung von 0.15 Bogensekunden (entsprechend 3000 Lichtjahren am Ort des Quasars) fand sich eine 12000 Lichtjahre lange und 4500 Lichtjahre breite Wolke aus CO-Gas (Abb. II.5.3). Geht man von einem üblichen Häufigkeitsverhältnis von CO zu dem häufigsten Gas H_2 aus, so erhält man eine gesamte Gasmasse von 1.6×10^{10} Sonnenmassen. Bei diesem Gebilde könnte es sich um eine Scheibe handeln, die in gebundener Rotation um das Zentrum des Quasars rotiert. Wenn diese Annahme stimmt, so lässt sich aus der Breite der



CO-Linie eine Rotationsgeschwindigkeit von 280 km/s ableiten. Sie führt über das Keplersche Gesetz zu einer (dynamischen) Masse von etwa 5×10^{10} Sonnenmassen. Die aus den CO-Daten ermittelte Gasmasse fügt sich demnach in diesen Rahmen gut ein. Allerdings kann es über die Gasmasse hinaus nicht viel mehr weitere Materie geben. Das ist in einer bestimmten Hinsicht sehr bemerkenswert.

Untersuchungen naher Galaxien mit zentralen Schwarzen Löchern haben eine sehr enge Korrelation zwischen der Masse des Schwarzen Lochs und derjenigen der Sterne im umgebenden zentralen Verdickung (»Bulge«) der umgebenden Galaxie ergeben. Demnach enthält der Bulge etwa 700-mal so viel Materie wie das Schwarze Loch (s. Jahresbericht 2003, S. 74). Wenn diese Relation bereits im frühen Universum gegolten haben sollte, so müsste J1148+5251 einige 10^{12} Sonnenmassen an Materie in seinem Bulge enthalten. Die Beobachtungen ergeben aber einen um zwei Größenordnungen kleineren Wert. Wie lässt sich dieser Befund deuten?

In den derzeit diskutierten kosmologischen Szenarien deutet man die Massenrelation zwischen Schwarzen Loch und stellarem Bulge so, dass sich diese beiden Komponenten einer Galaxie gleichzeitig entwickeln. Die geringe Masse im Bulge von J1148+5251 ließe sich dahingehend interpretieren, dass das Schwarze Loch zuerst entstanden und zu seiner enormen Größe herangewachsen ist, bevor sich der Bulge gebildet hat. In diesem Fall könnte man das Schwarze Loch als »Kondensationskeim« für die Galaxienbildung ansehen.

(Fabian Walter, Beteiligte Institute: National Radio Astronomy Observatory, Socorro, USA, Max Planck Institut für Radioastronomie, Bonn, Institut d'Astrophysique Spatiale, Universite de Paris-Sud, Frankreich, National Radio Astronomy Observatory, Charlottesville, USA, Steward Observatory, Tucson, USA, Princeton University Observatory, Princeton, USA)

II.6 Warum sinkt die kosmische Sternentstehungsrate?

Eine zentrale Frage der modernen Kosmologie betrifft die zeitliche Entwicklung der Sternentstehungsrate. Jüngere Forschungsergebnisse belegen, dass diese in der zweiten »Lebenshälfte« des Universums etwa auf ein Zehntel abgenommen hat. Die Ursache hierfür ist noch weitgehend unklar. Ein internationales Astronomenteam unter der Leitung des MPIA untersuchte jüngst die Sternentstehungsrate in Galaxien bei $z=0.7$. Damals war das Universum etwa halb so alt wie heute. Es ergab sich, dass eine abnehmende Wechselwirkung zwischen den Galaxien nicht die Hauptursache für die stark rückläufige Sternentstehungsrate in den vergangenen sieben Milliarden Jahren sein kann. Hierfür müssen andere Vorgänge im Innern von Spiralgalaxien verantwortlich sein.

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Methoden entwickelt, um die Sternentstehungsrate in fernen Galaxien zu ermitteln. Gemeinhin gilt die Intensität der UV-Strahlung junger, heißer Sterne als guter Indikator. Große Staubmassen, die in Sternentstehungsgebieten notwendigerweise vorhanden sind, können aber einen Großteil der UV-Strahlung absorbieren. Daher ist auch die thermische Infrarotstrahlung des von jungen Sternen aufgeheizten Staubes ein Maß für die Sternentstehungsrate. Andere Indikatoren sind starke Linienemission, wie sie hoch angeregte Wasserstoff- und Sauerstoff-Ionen aussenden, oder Radio- und Röntgenemission.

Besonders aussagekräftig, aber auch sehr aufwändig, sind Studien, in denen man Beobachtungsdaten aus verschiedenen Wellenlängenbereichen heranzieht. Diesen Weg gingen die Forscher des MPIA, wobei sie zum Teil auf Himmelsdurchmusterungen zurückgreifen konnten, die in jüngster Vergangenheit unter der Leitung des MPIA entstanden sind.

Der multispektrale Datensatz

Für den Bereich des sichtbaren Lichts standen ihnen die Daten der Galaxiendurchmusterung COMBO-17 (Classifying Objects by Medium-Band Observations with 17 Filters) zur Verfügung. Im Rahmen dieses am MPIA durchgeführten Surveys wurde ein großes Himmelsareal durch 17 Filter hindurch aufgenommen und die Helligkeiten von Galaxien in entsprechend vielen Farbbereichen gemessen. Das ermöglicht es, Galaxien zu klassifizieren und deren Rotverschiebungen bis zu einer Rothelligkeit von 24 mag bis auf wenige Prozent genau zu bestimmen. Entscheidende Voraussetzung für

das Projekt war das große Bildfeld der Weitfeldkamera (Wide Field Imager, WFI), die unter Leitung des MPIA entwickelt und gemeinsam mit der ESO gebaut worden war. Sie arbeitet am 2.2-Meter-MPG/ESO-Teleskop auf La Silla und besitzt ein 32×33 Quadratbogenminuten großes Bildfeld, entsprechend etwa der Fläche des Vollmondes.

Eine speziell entwickelte Software identifiziert in den COMBO-17-Daten neben Sterntypen und Quasaren auch verschiedene Galaxientypen, wie Elliptische, Spiralgalaxien sowie Starburstgalaxien mit ungewöhnlich hoher Sternentstehungsrate. Insgesamt sind rund 25000 Galaxien erfasst, womit COMBO-17 weltweit zu den umfangreichsten und am tiefsten reichenden Surveys zählt.

Als zweiter bedeutender Datensatz konnten die Astronomen auf die unter Leitung des MPIA entstandene Himmelsaufnahme GEMS (Galaxy Evolution from Morphology and Spectral Energy Distributions) zurückgreifen, die bis dahin größte mit dem Weltraumteleskop HUBBLE gewonnene Farbaufnahme (Jahresbericht 2003, S. 40). Das GEMS-Aufnahmefeld hat ebenfalls eine Größe von 28×28 Quadratbogenminuten und setzt sich aus 78 mit der Advanced Camera for Surveys (ACS) gewonnenen Einzelaufnahmen zusammen, die jeweils in zwei Wellenlängenbereichen um 606 nm und 850 nm gewonnen wurden. In einer Galaxie mit einer Rotverschiebung $z=0.7$ lassen sich so noch Details von 500 bzw. 700 pc (1600 Lj bzw. 2300 Lj) erkennen. Damit sind große Sternentstehungsgebiete und andere typische Strukturen, deren Ausdehnung wenige tausend Lichtjahre beträgt, mit brillanter Auflösung erkennbar. (Abb. II.6.1 a)

Das GEMS-Feld liegt innerhalb des CHANDRA Deep Field South (CDFS), das mit dem Weltraumteleskop CHANDRA im Röntgenbereich aufgenommen wurde. Somit standen den Astronomen von einigen Galaxien auch diese Daten zur Verfügung. Zu diesem multispektralen Datensatz kamen noch Infrarotaufnahmen hinzu, die mit dem Weltraumteleskop SPITZER bei $24 \mu\text{m}$ Wellenlänge gewonnen wurden (Abb. II.6.1 b). Dieses Feld war 90×30 Bogenminuten groß und überdeckte das CDFS.

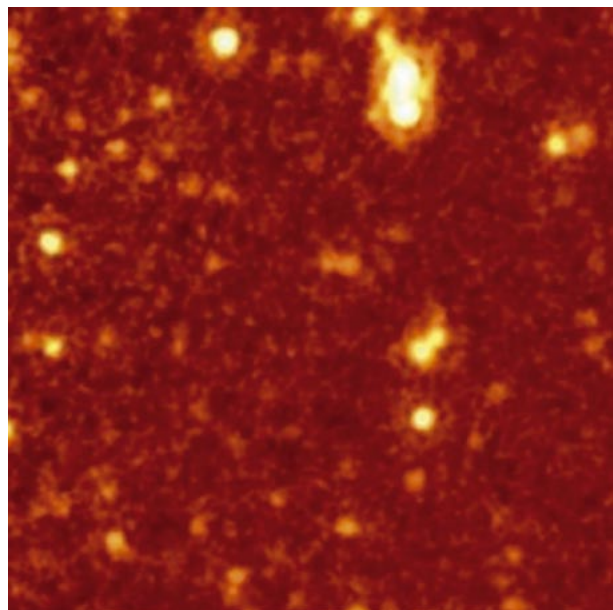
Die Strategie der neuen Studie bestand darin, aus COMBO-17 alle Galaxien auszuwählen, die sich in einem engen Rotverschiebungsbereich von $0.65 < z < 0.75$ befinden. Dies entspricht einer mittleren Rückblickzeit von sieben Milliarden Jahren, also etwa dem halben Weltalter, und einem Zeitintervall von 500 Millionen Jahren. Diese Objekte wurden dann in den anderen Surveys identifiziert und die Daten kombiniert. Hieraus wurden schließlich die jeweilige Sternentstehungsrate



Abb. II.6.1: *oben* Teil der GEMS-Aufnahme, der für die Untersuchung der kosmischen Sternentstehungsrate verwendet wurde; *rechts* derselbe Himmelsbereich, aufgenommen mit SPITZER bei $24\ \mu\text{m}$ Wellenlänge. Die Seitenlänge der Bilder beträgt etwa 3.5 Bogenminuten.

und der Galaxientyp ermittelt und diese Werte mit denen der Galaxien im heutigen Universum verglichen. COMBO-17 enthielt in dem ausgewählten Rotverschiebungsbzw. Entfernungsbereich 1727 Galaxien. Davon ließen sich 442 sowohl in der SPITZER- als auch in der GEMS-Aufnahme identifizieren.

Bei Galaxien im heutigen Universum ermittelt man die Sternentstehungsrate beispielsweise aus der gesamten Infrarotstrahlung im Bereich von $8\ \mu\text{m} - 1000\ \mu\text{m}$. Da SPITZER nur einen Wert bei $24\ \mu\text{m}$ liefert, mussten die Astronomen eine bekannte Korrelation anwenden, mit der sich aus diesem einen Wert die Gesamtleuchtkraft



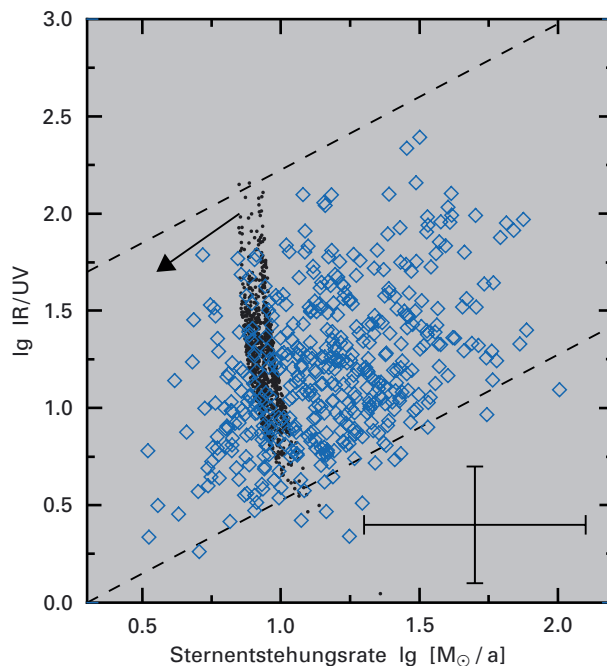
berechnet. Aus den COMBO-17-Daten wurden nun noch die UV-Flüsse der Objekte hinzugezogen. Auf diese Weise erhält man sowohl die direkte Emission der jungen Sterne als auch die vom Staub re-emittierte IR-Strahlung. Das war die große Stärke der Untersuchung.

Aus diesen Daten errechneten die Astronomen die Infrarotleuchtkraft aller Galaxien in dem ausgewählten Rotverschiebungsbereich um $z=0.7$ zu 7×10^{13} Sonnenleuchtkräften, die UV-Leuchtkraft betrug hingegen nur 1.5×10^{13} Sonnenleuchtkräfte. Bei einer mittleren Rotverschiebung von 0.7 ist somit das Verhältnis IR/UV = 7 (Abb. II.6.2). Das heißt, der weitaus größte Teil der Gesamtstrahlung liegt im Infraroten, wie man es von staubreichen Starburst-Galaxien kennt.

Ursachen für die abnehmende Sternentstehung

Interessant war nun die Frage, welche Galaxientypen in welchem Maße zur Sternentstehung beigetragen haben, als das Universum etwa halb so alt war wie heute. Hier war insbesondere die GEMS-Aufnahme mit ihrer hohen räumlichen Auflösung entscheidend. Das Resultat war überraschend: Den größten Beitrag zur gesamten IR-Leuchtkraft lieferten die Spiralgalaxien, bei den besonders Leuchtkräftigen IR-Quellen traten zunehmend wechselwirkende Galaxien auf. Elliptische Galaxien

Abb. II.6.2: Das Verhältnis von IR- zu UV-Strahlung in Abhängigkeit von der Sternentstehungsrate. Offene Rauten stehen für die mit SPITZER gemessenen Galaxien, Punkte sind obere Grenzen. Der Pfeil deutet an, in welche Richtung sich die Messwerte der nicht detektierten Objekte verschieben können. Die gestrichelten Linien kennzeichnen den Bereich der Galaxien im heutigen Universum.



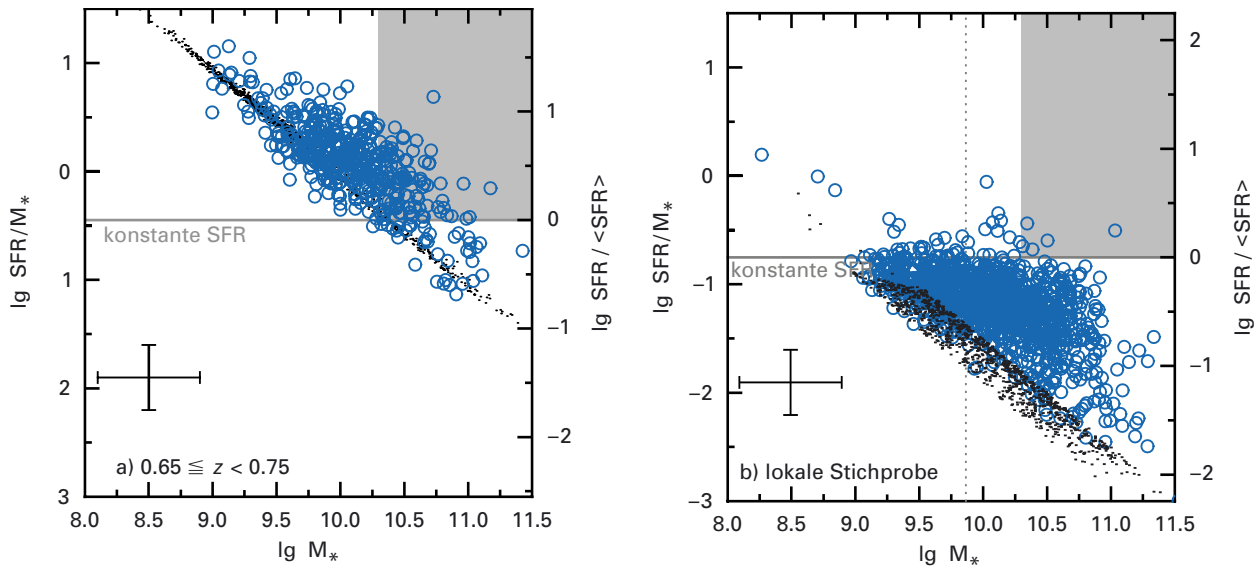
spielten eine geringere Rolle. Die relativen Anteile an der gesamten IR-Leuchtkraft betrugen: Spiralgalaxien 50 %, Elliptische und S0-Galaxien 10 %, wechselwirkende Galaxien 30 % und irreguläre Galaxien 10 %.

Hieraus ziehen die Astronomen folgenden Schluss: Die starke Abnahme der Sternentstehungsrate in der zweiten Entwicklungshälfte des Universums ist nur zum Teil darauf zurückzuführen, dass immer weniger Galaxien miteinander wechselwirken oder gar verschmelzen. Bislang waren viele Astronomen davon ausgegangen, dass bei der Wechselwirkung zwischen Galaxien das interstellare Gas in den Systemen verwirbelt wird, wodurch die Sternentstehungsrate angeregt wird. Da wegen der Expansion des Universums die Wechselwirkungen seltener werden, sollte deswegen auch die kosmische Sternentstehungsrate sinken. Nach den neuen Untersuchungen ist dieser Effekt zwar grundsätzlich vorhanden, jedoch nicht ausschlaggebend – zumindest nicht in der zweiten Lebenshälfte des Universums. Vielmehr nimmt die Sternentstehungsrate offenbar in den großen, ungestörten Spiralgalaxien ab.

Über die Ursache hierfür lässt sich zurzeit nur spekulieren. Möglicherweise geht in den Spiralgalaxien das interstellare Gas und damit der Rohstoff für neue Sterne zur Neige, vielleicht spielen aber auch Wechselwirkungen mit kleinen Satellitengalaxien, die auf der GEMS-Aufnahme nicht erkennbar sind, eine Rolle.

Als aufschlussreich erwies sich auch die Untersuchung der so genannten spezifischen Sternentstehungsrate (SFR). Das ist die Sternentstehungsrate, normiert auf die in der Galaxie vorhandene Sternmasse. Diese Größe ist eng verwandt mit der mittleren vergangenen $\langle \text{SFR} \rangle$. Diese Größe ergibt sich, wenn man die stellare Masse durch den Zeitraum teilt, der seit der Entstehung der ersten Sterne in dieser Galaxie vergangen ist. Bei ihrer Analyse gingen die Astronomen von der vereinfachenden Annahme aus, dass in den betrachteten Galaxien fast alle Sterne bei $z=4$, das heißt vor 12 Milliarden Jahren, entstanden sind.

Abb. II.6.3 zeigt die so gewonnene spezifische Sternentstehungsrate (SFR) normiert auf die mittlere vergangene Sternentstehungsrate. Hier werden, bedingt durch die Empfindlichkeit der Beobachtungen, nur Galaxien mit stellaren Massen von mindestens 2×10^{10} Sonnenmassen erfasst. Ein Wert von 1 bedeutet, dass die aktuell gemessene spezifische Sternentstehungsrate gleich der mittleren vergangenen Sternentstehungsrate ist. Links sind die Galaxien um $z=0.7$, rechts die Galaxien aus dem heutigen Universum aufgetragen. Der Unterschied ist deutlich: Die heutigen Galaxien zeigen eine breite Verteilung mit relativ niedrigen spezifischen Sternentstehungsraten zwischen 0.03 und 0.2. Nicht einmal ein Prozent aller Objekte besitzt Werte oberhalb von 1, wo man die Starburst-Galaxien erwartet. Ganz anders die Verteilung der Galaxien im jungen Universum. Hier besitzen fast 40 % Werte größer als 1 und sind somit Starbursts, die bei $z=0.7$ teilweise erheblich mehr neue



Sterne hervorbringen als es ihrer mittleren vergangenen Sternentstehungsrate entspricht. Und diese Starburst-Population besteht überwiegend aus Spiralgalaxien und nur zu einem geringeren Teil aus wechselwirkenden Systemen.

Diese neuen Erkenntnisse werden helfen, derzeitige Modelle der kosmischen Entwicklung zu verbessern. Diese Modelle machen heute keine Aussage darüber, wie stark die Wechselwirkung und das Verschmelzen von Galaxien die kosmische Sternentstehung beeinflusst haben.

Die hier vorgestellte multispektrale Untersuchung stellt den Beginn einer umfassenderen Studie dar. Zukünftig sollen Bilder von SPITZER bei $70 \mu\text{m}$ und $160 \mu\text{m}$ Wellenlänge aufaddiert werden, um ein globaleres Verständnis von der durchschnittlichen spektralen Energiedichte der Galaxienstrahlung zu erhalten. Längerfristig sollen neue Teleskope wie APEX, ALMA und HERSCHEL Antworten auf die gestellten Fragen liefern.

Abb. II.6.3: Die spezifischen Sternentstehungsraten im Vergleich: Links die Galaxien im jungen Universum ($z = 0.7$), rechts im heutigen. Die höhere Sternentstehungsrate bei $z = 0.7$ ist deutlich.

(Eric F. Bell, Marco Barden,
Klaus Meisenheimer, Hans-Walter Rix.

Beteiligte Institute:
Steward Observatory, Tucson, USA,
University of Oxford, Oxford, UK,
Space Telescope Science Institute, Baltimore, USA,
McDonald Observatory, Fort Davis, USA,
University of Massachusetts, Amherst, USA)

III. Wissenschaftliche Arbeiten

III.1 Braune Zwerge – Entstehung, Scheiben, Doppelsysteme und Atmosphären

Seit Tausenden von Jahren haben die Sterne Menschen zum Staunen und Forschen angeregt. Sie wirklich wissenschaftlich zu verstehen begann man jedoch erst im 19. Jahrhundert, als Forscher wie Fraunhofer, Kirchhoff und Bunsen die Spektroskopie entwickelten. Man stellte fest, dass Sterne eine breite Palette an Spektren aufweisen, und ordnete sie in immer kompliziertere Klassifikationsschemata ein. Aber was sind die Sterne? Aus was bestehen sie? Wie leuchten sie? Warum zeigen sie diese Unterschiede in ihren Spektren?

Einer der großen Erfolge der Astrophysik im 20. Jahrhundert war die Entwicklung detaillierter Modelle des Sternaufbaus, die auf physikalischen Theorien der Mechanik, der Thermodynamik, des Strahlungstransports und später der Kernphysik beruhten. Durch ausführliche Beobachtungen geeicht und verbessert, erwiesen sich diese Modelle als fähig, die Eigenschaften und auch die zeitliche Entwicklung von Sternen erstaunlich genau und detailliert zu beschreiben.

Besonders wichtig war die Entdeckung der wasserstoffbrennenden Hauptreihe: Alle Sterne durchlaufen eine relativ ruhige und stabile Phase des Wasserstoffbrennens, wobei in der zentralen Kernregion des Sterns Wasserstoff durch thermonukleare Fusion in Helium umgewandelt wird. Die hierbei freigesetzte Energie lässt den Stern leuchten. Bei diesem Prozess ist die Masse des Sterns der wichtigste Faktor. Die massereichsten Sterne leuchten sehr hell und sind sehr kurzlebig. Sie verweilen weniger als eine Million Jahre auf der Hauptreihe. Weiter unten auf der Hauptreihe, bei den Sternen geringerer Masse, sind auch die Zentraltemperaturen geringer und damit die Kernreaktionen weniger heftig. Folglich sind die Sterne leuchtschwächer und verbleiben länger auf der Hauptreihe.

Was geschieht, wenn wir zu immer kleineren Massen hinunter gehen? Theoretisch gibt es eine Masse, unterhalb derer kein Wasserstoffbrennen mehr möglich ist. Sie liegt bei etwa $0.075 M_{\text{Sonne}}$, der »Grenze für Wasserstoffbrennen«. Sterne unterhalb dieser Grenzmasse kühlen im Wesentlichen einfach nur ab und werden mit der Zeit immer leuchtschwächer, während sie ihre Gravitationsenergie abstrahlen. Bereits in den 1960er Jahren wurden theoretische Vorhersagen über den Aufbau und die beobachtbaren Eigenschaften solcher »Braunen Zwerge« (BZ) gemacht und detaillierte Modelle aufgestellt, lange bevor die ersten überhaupt entdeckt waren.

Die Entdeckung Brauner Zwerge

In den 1980er und 1990er-Jahren entdeckte man eine Reihe von Objekten mit sehr geringer Leuchtkraft und niedriger Temperatur, typischerweise bei tiefen optischen und Infrarot-Durchmusterungen oder bei Untersuchungen von Eigenbewegungen. Doch bei all diesen BZ-Kandidaten konnte man nicht sicher sein, ob ihre Massen unter der Grenze für Wasserstoffbrennen lagen. Die Massen konnten nämlich nicht direkt (d.h. dynamisch) bestimmt werden, sondern mussten mit Hilfe von Sternaufbau- und Entwicklungsmodellen für Braune Zwerge aus den beobachteten Leuchtkräften und Effektivtemperaturen abgeleitet werden. Diese Modelle waren jedoch sehr unsicher, so dass nicht klar war, ob die Kandidaten über oder unter der entscheidenden Massengrenze lagen.

Ein wichtiger Fortschritt wurde mit dem so genannten »Lithium-Test« erzielt, den Rafael Rebolo, auswärtiges wissenschaftliches Mitglied unseres Instituts, und seine Mitarbeiter am IAC in Spanien vorschlugen. Lithium »brennt« in thermonuklearen Reaktionen bei etwas niedrigeren Temperaturen als Wasserstoff. Die meisten Sterne enthalten nur wenig Lithium – ein beim Urknall erzeugtes Element – und brauchen es daher in kurzer Zeit auf (innerhalb von größenordnungsmäßig 100 Millionen Jahren bei massearmen Sternen, bei massereicheren schneller).

Alle Braunen Zwerge bis auf die massereichsten sind jedoch zu kühl, um Lithium zu verbrennen, sodass es nicht verbraucht wird. Wenn wir also Lithium in der Atmosphäre eines massearmen Objekts durch die entsprechende Absorptionslinie in seinem Spektrum nachweisen, dann wissen wir, dass es sich um einen Braunen Zwerg handeln muss. Obwohl sich dieser Test in vielen Fällen als nützlich erwiesen hat, ist er nicht immer eindeutig. Sehr junge massearme Sterne hatten möglicherweise noch nicht genügend Zeit, ihr Lithium zu verbrennen, und lassen sich daher nicht von Braunen Zwergen unterscheiden. Außerdem verbrennen auch die massereichsten Braunen Zwerge Lithium. Wenn ein kühles Objekt also kein Lithium besitzt, kann es dennoch ein Brauner Zwerg sein.

Der erste wirklich eindeutige Nachweis eines Braunen Zwergs gelang 1995 einem Team in den USA unter der Leitung von T. Nakajima (Caltech). Sie entdeckten einen sehr schwachen, kühlen Begleiter um den massearmen Stern Gl 229 (siehe Abb. III.1.1). Das Bemerkenswerte an diesem Begleiter, Gl 229B genannt, war, dass er starke

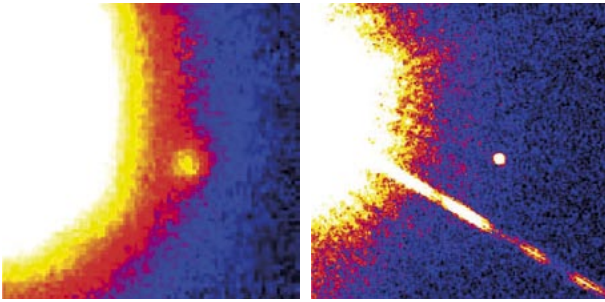
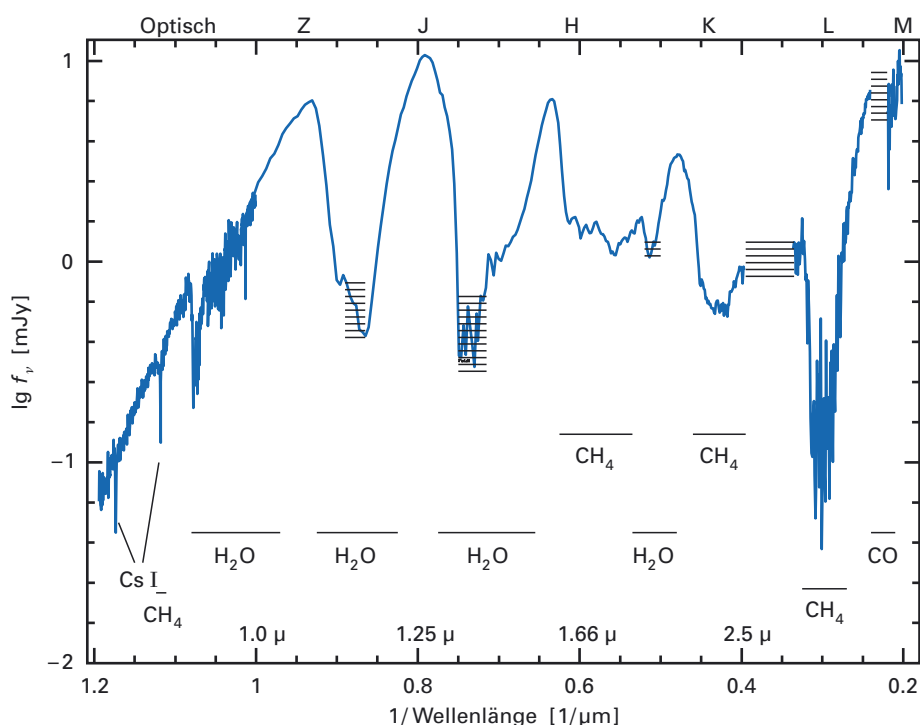


Abb. III.1.1: Die Entdeckung des kühlen Braunen ZwerGs Gl 229B. Der Braune Zwerg ist das schwache Objekt rechts neben seinem Mutterstern, Gl 229. Die Aufnahme rechts wurde mit dem HST gemacht; sie ist beugungsbegrenzt, d.h. sie erzielt eine höhere räumliche Auflösung.

Methanabsorptionsbanden in seiner Atmosphäre aufwies (Abb. III.1.2). Das Methanmolekül kann sich aber nur bei sehr niedrigen Temperaturen bilden, sehr viel niedriger als bei irgendeinem Stern möglich. Also musste dies ein Brauner Zwerg sein. Dieser Braune Zwerg hat eine so kühle Atmosphäre, weil er alt ist (vorausgesetzt er hat das gleich Alter wie sein Mutterstern): Ohne eine nukleare Energiequelle kühlen Braune Zwerge ab und werden mit der Zeit immer leuchtschwächer. Dadurch

Abb. III.1.2: Spektrum von Gl 229B im nahen Infrarot. Die Wellenlänge steigt nach rechts an; oben ist die Position der photometrischen Standardfilter angegeben. Spektrale Banden von Methan (CH_4) und Wasser (H_2O) sind gekennzeichnet. (Aus Oppenheimer et al. ApJ, 502, 932, 1998).



sind sie in fortgeschrittenem Alter schwer zu entdecken. Doch hat man sie einmal entdeckt, sind sie anhand ihrer charakteristischen Atmosphäre leichter von massearmen Sternen zu unterscheiden.

Heute kennen wir Hunderte von Braunen ZwerGen. Sie scheinen in der Sonnenumgebung (und vermutlich auch im Rest der Galaxis) ebenso häufig zu sein wie wasserstoffbrennende Sterne. Wegen ihrer geringen Masse tragen sie jedoch nur einen kleinen Bruchteil zur Gesamtmasse der Galaxis bei. Daher ist es sehr unwahrscheinlich, dass sie einen wesentlichen Beitrag zur »Fehlenden Masse« oder »Dunklen Materie« liefern.

Kühl und leuchtschwach: Eigenschaften Brauner Zwerge

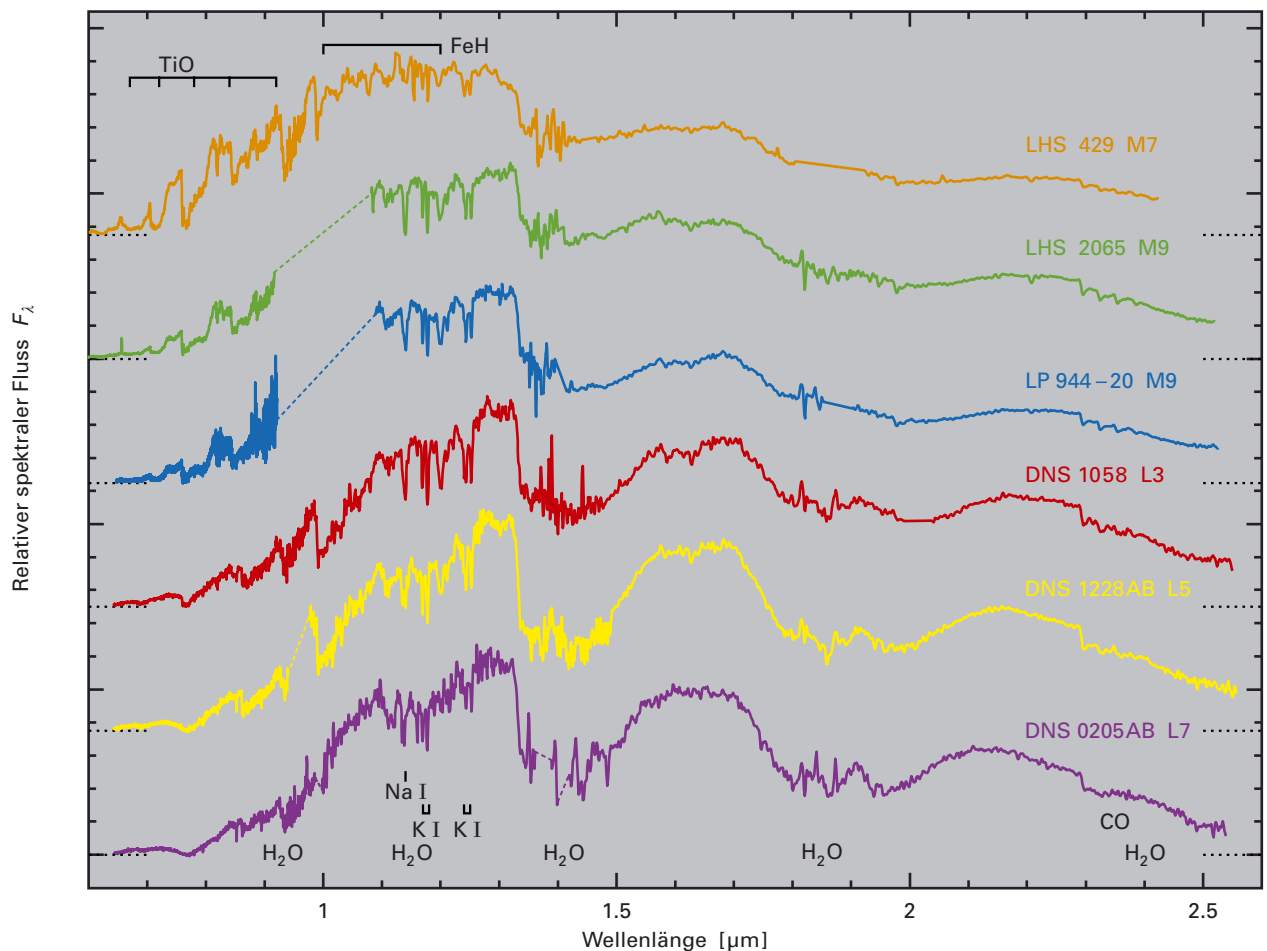
Wegen ihrer geringen Masse sind Braune Zwerge kühl, mit Effektivtemperaturen unter 2000 K. Ungeachtet ihrer chemischen Zusammensetzung erscheinen diese Objekte sehr rot, wobei der Großteil ihrer Strahlung im nahen Infrarotbereich des Spektrums (bei Wellenlängen um $1\ \mu\text{m}$) und nur sehr wenig im Optischen ausgesandt wird (Abb. III.1.3). Dies liefert uns eine der wichtigsten Nachweismethoden für diese Objekte, nämlich anhand ihrer im Vergleich zu fast allen anderen Sternarten äußerst roten optisch-infraroten Farben (z.B. des R-J-Index). Überdies zeigen Berechnungen des thermochemischen Gleichgewichts, dass sich bei diesen niedrigen Temperaturen zahlreiche Moleküle sowie auch flüssige und feste Teilchen (insgesamt »Staub« genannt) bilden. Diese dominieren die beobachteten Spektren Brauner Zwerge (obgleich das häufigste chemische Ele-

ment Wasserstoff ist). Dadurch entstehen sehr charakteristische Spektren, die in zwei breite Spektralklassen unterteilt wurden. Die erste Klasse, »L« genannt, ist durch Metallhydrid-Linien (z.B. CrH und FeH) und neutrale Alkalimetalle (Na, K, Rb, Cs) in ihren roten optischen Spektren ($0.6\text{--}1.0\ \mu\text{m}$) gekennzeichnet. Die zweite Klasse, »T«, kann durch starke Wasser- und insbesondere Methanbanden im nahen Infrarotspektrum ($1\text{--}2.5\ \mu\text{m}$) identifiziert werden. Gl 229B ist der Prototyp der T-Zwerge. Die Zuordnung von Effektivtemperaturen zu diesen Spektralklassen ist wegen der komplexen Chemie und der möglichen Dynamik in ihren Atmosphären schwierig, wie später noch besprochen werden wird. Aber in groben Zügen überdecken die L-Zwerge den Temperaturbereich von 2100 bis 1300 K und die T-Zwerge den von 1300 bis 600 K. »L«- und »T«-Typen sind damit die kühleren Fortsetzung der bekannten Spektralklassensequenz OBAFGKM. (Bei der Beschreibung ihrer spektralen

Energieverteilung bezeichnen wir M-, L- und T-Zwerge gemeinsam als »ultrakühle Zwerge«. Welcher Masse eine bestimmte Spektralklasse entspricht – d.h. ob es ein massearmer Stern oder ein Brauner Zwerg ist – hängt vom Alter ab. Der Grund hierfür ist, dass Braune Zwerge sich mit der Zeit abkühlen und somit beim Altern immer spätere Spektraltypen erreichen.)

Wie durch das Fehlen eines merklichen nuklearen Brennens definiert, besitzen Braune Zwerge Massen von weniger als etwa $0.075\ M_{\text{Sonne}}$ (entsprechend etwa $80\ M_{\text{Jupiter}}$). Bei noch geringeren Massen erreicht man den Bereich der extrasolaren Planeten, von denen inzwischen rund 150 entdeckt wurden. Ihre Massen liegen zwischen der des Saturn und mehreren Jupitermassen. Bedeutet dies, dass es ein Kontinuum zwischen Planeten und Sternen gibt? Ja und nein. Jedes gasförmige Objekt, das kein Wasserstoffbrennen zünden kann, nennen wir ein »Objekt substellarer Masse«. Planeten wie Braune Zwerge sind demnach Objekte substellarer Masse. Allgemein wird ein Planet definiert als Körper, der sich in einer Akkretionsscheibe um einen Stern aus den vom Sternentstehungsprozess übrig gebliebenen Trümmern bildet. Sterne andererseits bilden sich beim Kollaps einer Gaswolke im interstellaren Medium. Objekte, die auf diese Weise entstanden, aber zu wenig Masse

Abb. III.1.3: Spektren ultrakühler Zwerge im nahen Infrarot. Die Spektralklassensequenz wird von oben nach unten durchschritten, von den späten M-Zwergen (M6) zu den späten L-Zwergen (L7). Ultrakühle Zwerge geben den Großteil ihrer Strahlung zwischen 1 und $2.5\ \mu\text{m}$ ab. Markante Molekülbanden sind gekennzeichnet. (Aus Leggett et al. *ApJ*, 548, 908, 2001).



besitzen, um nukleares Wasserstoffbrennen zu zünden, würden wir Braune Zwerge nennen. Die zweckmäßigste Unterscheidung zwischen einem Planeten und einem Braunen Zwerg besteht daher nicht in seinen Eigenschaften oder in seiner Masse, sondern in der Art und Weise, wie er entstand. Bisher wissen wir noch nicht, welches die kleinste Masse ist, die durch den Sternentstehungsprozess gebildet werden kann: Es könnte durchaus sein, dass einige Braune Zwerge geringere Massen haben als die massereichsten Planeten, d.h. dass sich die Massenfunktionen von Braunen Zwergen und Planeten überschneiden. Wie wir im Folgenden erkunden werden, gibt es in der Tat zahlreiche neue Ideen und Theorien über die Entstehung Brauner Zwerge.

Der Ursprung Brauner Zwerge

Für die Entstehung Brauner Zwerge wurden mindestens vier verschiedene Mechanismen vorgeschlagen: dynamische Ausstoßung eines stellaren Embryos aus seinem Molekülwolkenmutterkern durch gravitative Wechselwirkungen; opazitätsbegrenzte Fragmentation einer durch Stoßwellen komprimierten Gasschicht; gravitative Instabilitäten in Scheiben; Verdampfung kleiner Wolkenkerne in Entstehungsgebieten massereicher Sterne. Doch Braune Zwerge entstehen nicht notwendigerweise nur durch einen dieser Prozesse. So könnte die Auflösung von Akkretionshüllen um protostellare Kerne geringer Masse in Gebieten wie dem Kern des Orionnebel-Haufens – wo es genügend massereiche Sterne gibt, die die erforderliche intensive Ultraviolettstrahlung aussenden – ein funktionierender Entstehungsmechanismus sein. Doch in Regionen wie dem Taurus-Auriga-Sternentstehungsgebiet, wo es keine massereichen Sterne gibt, wäre Verdampfung keine Erklärung für die Entstehung Brauner Zwerge.

Als Jugendliche aus dem Nest geworfen

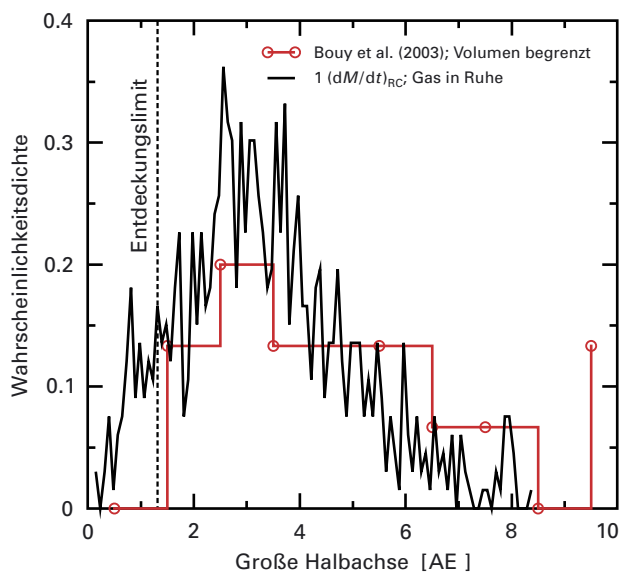
Die Suche nach einem universelleren Bildungsmechanismus für Braune Zwerge führte Bo Reipurth (University of Hawaii) und Cathie Clarke (University of Cambridge) zu dem Vorschlag, dass es sich bei Braunen Zwergen um substellare Objekte handelt, weil sie aus kleinen neugeborenen Vielfachsternsystemen ausgestoßen wurden, die durch dynamische Wechselwirkungen zerfallen sind. Das heißt, Braune Zwerge sind gescheiterte Sterne, da der Akkretionsprozess unterbrochen wurde, ehe sich ein Kern mit genügend Masse bilden konnte, um Wasserstoff zu zünden. In einem kleinen Vielfachsternsystem konkurrieren die verschiedenen Mitglieder um die einfallende Materie, und dasjenige, das am langsamsten wächst, wird am ehesten herausgeschleudert. Doch selbst wenn die Mitglieder fast gleiche Massen haben, sind diese Systeme so instabil, dass unweigerlich ein Mitglied zu

einem frühen Zeitpunkt, wenn es noch eine sehr geringe Masse hat, hinausgeschleudert wird. Dieser Mechanismus hat jüngst viel Aufmerksamkeit erregt, da er möglicherweise erklärt, warum Braune Zwerge so selten als enge Begleiter normaler Sterne vorkommen, warum es keine weiten BZ-Doppelsterne gibt, und warum das untere Ende der ursprünglichen Massenfunktion abgeflacht ist. Natürlich müssen sich die substellaren Kerne selbst noch vor dieser Ausstoßung bilden. Hydrodynamische Simulationen deuten darauf hin, dass dies in gravitativ instabilen Scheiben oder kollabierenden Filamenten geschieht.

Im Rahmen seiner Doktorarbeit untersuchte Stefan Umbreit mit Hilfe statistischer N-Körper-Simulationen den dynamischen Zerfall nicht-hierarchischer Dreifachsysteme als Bildungsmechanismus für Braune Zwerge. Er konnte zeigen, dass Akkretion und nachfolgende Schrumpfung von Dreifachsystemen die Geschwindigkeiten im Vergleich zu nichtakkretierenden Systemen deutlich anwachsen lässt und die Ausstoßung noch wahrscheinlicher macht. Überdies sind die Simulationen mit der beobachteten Verteilung der großen Halbachsen in einer volumenbegrenzten Stichprobe von Doppelten Braunen Zwergen vereinbar (Abb. III.1.4).

Dynamische Ausstoßung ist ein gewaltsamer Vorgang. Daher erwartet man, dass auf diese Weise entstandene Braune Zwerge keine massereiche Scheiben zurückbehalten. Ebenso wäre es schwierig, sehr weite Doppelsysteme

Abb. III.1.4: Verteilung der großen Halbachsen bei Doppelsystemen mit Braunen Zwergen, wie sie sich aus unseren Simulationen zerfallender Dreifachsysteme ergibt (akkretierendes Gas in Ruhe). Diese wird verglichen mit der von Bouy et al. (2003) beobachteten Verteilung. Beide Verteilungen stimmen sehr gut überein, da beide ein Maximum bei etwa demselben Wert von $a = 3$ AE haben und in etwa den gleichen Grad an Asymmetrie um diesen Wert zeigen.



Brauner Zwerge auf diese Weise zu bilden (da derartig schwach gebundene Systeme beim Ausschleudern eher auseinandergerissen würden).

Um dies zu überprüfen, wurden mit Hilfe der N-Körper-Simulationen die Dichteprofile und die Lebensdauer von Scheiben um Braune Zwerge vorhergesagt. Die Frage ist, ob man sehr enge BZ-Doppelsterne durch Ausstoßung bilden und doch genügend große Scheiben um die einzelnen ausgestoßenen Braune Zwerge zurückbehalten kann, um sie in einem typischen Alter von 1–5 Millionen Jahren beobachten zu können. Die Simulationen haben ergeben, dass die Scheiben direkt nach einer nahen Begegnung (die zur Ausstoßung führt) stark gestutzt sind und ihre Größe sehr gering ist, meistens unter 5 AE. Außerdem liegen die Scheibenmassen gewöhnlich unter einer Jupitermasse. Aufgrund der allgemein niedrigen Akkretionsraten von BZ-Scheiben sollten jedoch mindestens 12 % dieser Scheiben sehr geringer Masse länger als 1 Million Jahre überleben. Daher sollte der Anteil der Braunen Zwerge mit Scheiben unter den jüngsten BZ zwar gering aber nicht vernachlässigbar sein; überdies sollte er größer sein, wenn sich weite BZ-Doppelsysteme bilden können. Diese Vorhersage kann durch Beobachtungen überprüft werden.

Zusätzlich zu den Eigenschaften der Scheiben und der Doppelstern-Statistik kann man Hinweise auf das Ausstoßungs-Szenarium auch durch die Beobachtung des kinematischen Verhaltens von Braunen Zwergen in jungen Assoziationen und Sternentstehungsgebieten erhalten. Wenn das Ausstoßungs-Szenarium den wichtigsten Entstehungsmechanismus darstellt, würden wir auch erwarten, dass man Braune Zwerge in der Nähe massearmer Protosterne (so genannter Objekte der Klasse 0) beobachtet.

Scheiben um Braune Zwerge

Einen Hinweis auf die Natur und die Entstehung von Braunen Zwergen könnte die offenbare Ähnlichkeit junger Brauner Zwerge mit klassischen T-Tauri-Sternen (die Vorhauptreihenphase massearmer Sterne) liefern. Jüngste spektroskopische Durchmusterungen weisen darauf hin, dass junge Braune Zwerge bis hinab zu Massen nahe der Grenze für Deuteriumbrennen ($13 M_{\text{Jupiter}}$) T-Tauri-ähnliche Scheibenakkretion zeigen, wobei Strahlung in der $H\alpha$ -Linie als Indikator für Akkretion dient. Allgemein scheint die Akkretionsrate sehr rasch mit der Masse abzufallen (die Akkretionsrate ist in etwa proportional zu M^2) und mit dem Alter deutlich abzunehmen. Die gemessenen Akkretionsraten betragen manchmal nur $10^{-12} M_{\text{Sonne}}/\text{Jahr}$. Die Tatsache, dass es über die Massengrenze für Wasserstoffbrennen hinweg keine Diskontinuität in der Beziehung zwischen den Akkretionsraten und Masse gibt, deutet auf einen gemeinsamen Scheiben-Akkretionsprozess für Braune Zwerge und klassische T-Tauri-Sterne hin, bei dem möglicherweise auch Magnetfelder eine entscheidende Rolle spielen.

Der nächste Schritt ist, nach direkten Anzeichen für Scheiben um Braune Zwerge zu suchen und ihre Massen zu bestimmen. Wie bei den T-Tauri-Sternen hat man erste Hinweise auf Scheiben um Braune Zwerge bei Durchmusterungen im nahen Infrarot erhalten, die einen Strahlungsüberschuss über das erwartete photosphärische Niveau hinaus anzeigen. Ein noch besserer Indikator ist erhöhte Emission bei Wellenlängen um $10 \mu\text{m}$, erzeugt durch warmen zirkumstellaren Staub. Der erste Nachweis von Braunen Zwergen bei diesen Wellenlängen geschah durch ISOCAM-Breitbandbeobachtungen in den Sternentstehungsgebieten Chamaeleon I und Rho Ophiuchi, die mit dem Infrared Space Observatory durchgeführt wurden. Zusammen mit unseren früheren Studenten Daniel Apai und Ilaria Pascucci (jetzt an der University of Arizona) sowie Michael Sterzik von der ESO haben wir mit Hilfe bodengebundener Teleskope nach der Strahlung Brauner Zwerge im mittleren Infrarotbereich gesucht, insbesondere nach der charakteristischen Emissionsbande von Silikaten bei $10 \mu\text{m}$. Diese Bande hat ein enormes analytisches Potential, da sie sowohl die optische Tiefe des emittierenden Materials als auch die Größe der Staubkörner anzeigt. Im Falle des jungen BZ-Kandidaten Cha Ha 2 fanden wir einen klaren Hinweis auf thermische Staubemission. Überraschenderweise zeigt das Objekt keinerlei Silikat-Emissionsbande, was entweder auf eine ziemlich flache Scheibengeometrie oder auf beachtliches Staubwachstum hindeutet. Im Falle des jungen (etwa 1 Million Jahre alten), sicher identifizierten Braunen Zwergs CFHT-BD-Tau 4 hatten wir mehr Glück. Mit Hilfe des T-ReCs-Instruments am Gemini-Süd-8-m-Teleskop gelang es uns, die charakteristische Silikat-Emissionsbande zu finden, welche die Existenz einer optisch dünnen Scheibenschicht beweist, ähnlich wie wir sie bei T-Tauri-Sternen beobachten. Eine genauere Analyse des Spektrums ergab einen ersten Hinweis auf Staubwachstum und sogar für die Ablagerung von Staub in der Scheibe dieses Objekts.

Die nächste Herausforderung bestand darin, die Strahlung dieser Scheiben im Millimeterbereich nachzuweisen. Diese ist ein direktes Maß für die Masse der Scheibe, wobei jedoch die Opazität des Staubs bekannt sein muss. Mit Hilfe des SCUBA-Bolometers am JCMT-Submillimeter-Teleskop auf Hawaii und des MAMBO-Arrays am IRAM-30-m-Teleskop auf dem Pico Veleta (Spanien) entdeckten wir zum ersten Mal Millimeteremission von zwei jungen Braunen Zwergen bei einem Flussniveau von einigen Millijansky. Unter der Annahme ähnlicher Staubopazitäten, wie sie bei der Abschätzung der Scheibenmasse bei T-Tauri-Sternen verwendet werden, erhielten wir für die Gesamtmassen der Scheiben Werte von einigen Jupitermassen. Dieses überraschende Ergebnis deutet auf die Möglichkeit hin, dass sich in den Scheiben um Braune Zwerge sogar Planeten bilden könnten.

Interessant ist, dass es eine Reihe von Quellen mit überschüssiger, von einer Scheibe stammenden Infrarot-

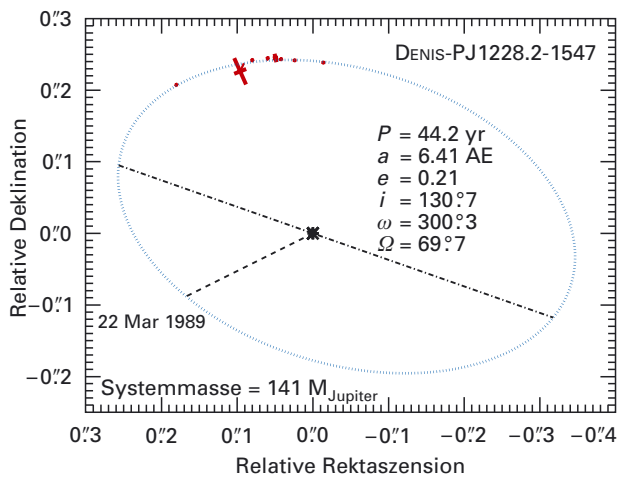


Abb. III.1.5: Umlaufbahn des BZ-Doppelsystems DENIS-PJ1228.2-1547. Die Kreuze und der Stern zeigen die relativen Positionen der beiden Doppelsternkomponenten in der Zeit von Juni 1998 bis Dezember 2003 an. Darüber gezeichnet ist eine mögliche Bahn (gepunktet) aufgrund der astrometrischen Daten. Die strich-gepunktete Linie ist die Knotenlinie, die gestrichelte Linie zeigt den Ort des Periastron.

strahlung gibt, die keinerlei Anzeichen für Akkretion aufweisen. Dies könnte eine weitere Parallele zu den T-Tauri-Sternen sein, bei denen Scheiben über die Hauptakkretionsphase hinaus bestehen bleiben können.

Mit Hilfe der im mittleren Infrarotbereich sehr empfindlichen Detektoren an Bord des Weltraumteleskops SPITZER könnte der Nachweis und die spektroskopische Untersuchung von BZ-Scheiben zur Routinebeobachtung werden. Mit einem Spektraltyp von M9.5 und einer Masse von etwa 15 Jupitermassen ist OTS 44 heute der kälteste und masseärmste Braune Zwerg, bei dem man eine zirkumstellare Scheibe gefunden hat. In der Zeit, in der dies niedergeschrieben wird, sind wir gerade dabei, die ersten Spektren von BZ-Scheiben mit SPITZER aufzunehmen.

Dynamische Bestimmung der Masse Brauner Zwerge: Doppelsysteme mit Braunen Zwergen

Eine der grundlegenden Eigenschaften eines astronomischen Objekts – sei es ein Planet, ein Stern, ein Sternhaufen oder gar ein Galaxienhaufen – ist seine Masse. Das »Wiegen« eines entfernten Objekts geschieht häufig mit Hilfe des Keplerschen Gesetzes. Im Falle von Doppelsystemen kann man die dynamischen Massen durch die Verfolgung der Umlaufbahnen und die Berechnung der Bahnparameter bestimmen.

Im Jahre 1998 begannen Wolfgang Brandner (MPIA, damals am JPL/Caltech) und Eduardo Martin (IAC, damals UC Berkeley) mit Hilfe des HUBBLE-Weltraumteleskops eine Untersuchung ultrakühler Sterne und Brauner Zwer-

ge vom Spektraltyp L mit hoher räumlicher Auflösung. Das Ziel war, Doppelsternbegleiter zu identifizieren, um dynamische Massen für die noch wenig untersuchte Klasse der Braunen Zwerge ableiten zu können. Darüber hinaus erhoffte man sich von Doppelsterneigenschaften wie Multiplizität, Verteilung der Abstände in Doppelsternen und dem Helligkeitsverhältnis ihrer Komponenten Aufschlüsse über die Entstehung von doppelten Braunen Zwergen.

Mit der Entdeckung des ersten räumlich aufgelösten L-Zwerg-Doppelsystems DENIS-P J1228.2-1547 war der Studie sofort Erfolg beschieden. Wie in der Doktorarbeit von Hervé Bouy (jetzt am IAC) zusammengefasst, sind inzwischen etwa 130 L-Zwerge überprüft worden, wobei mehr als 20 Doppelsysteme mit Winkelabständen zwischen 0.1 und 0.5 Bogensekunden (entsprechend projizierten Abständen zwischen 1 und 10 AE) in der Sonnenumgebung identifiziert wurden.

Die Vermessung der Bahnen

Für alle Doppelsysteme wurden Nachfolgebeobachtungen durchgeführt, um ihre Bahnbewegung zu überwachen und erste Schätzungen ihrer Umlaufperioden abzuleiten. DENIS-PJ1228.2-1547 erwies sich als ein relativ weites, langsames Doppelsystem mit einer Umlaufperiode von rund 50 Jahren (Abb. III.1.5). Das L-Zwerg-Doppelsystem 2MASSW J0746425+2000321, das erst im Jahr 2000 mit dem HST entdeckt wurde, besitzt jedoch eine sehr viel kürzere Umlaufperiode. In den vergangenen vier Jahren haben wir die Bahnbewegung mit dem HST, dem Gemini-Nord-Teleskop, dem VLT der ESO und dem Keck-Teleskop verfolgt. Bis Januar 2004 waren mehr als 60 % der Bahn abgedeckt, einschließlich des Durchgangs des Systems durch sein Periastron (Abb. III.1.6).

Die Bahnparameter ergeben, dass das System eine Exzentrizität von 0.4 hat, im Oktober 2002 sein Periastron passierte und eine Umlaufperiode von 10.5 Jahren besitzt. Somit hatten wir das große Glück, das Doppelsystem während seines Periastrondurchgangs zu erwischen, wodurch wir mehr als 60 % der Umlaufbahn in weniger als vier Jahren abdecken konnten.

Zusammen mit der genau bekannten Entfernung von 12.21 ± 0.05 pc ergibt dies für das System eine Gesamtmasse von 0.146 Sonnenmassen. Spektroskopische und photometrische Messungen der einzelnen Komponenten liefern dann Abschätzungen für die Masse jeder einzelnen Komponente. Das Hauptobjekt (Spektraltyp L0) erwies sich als sehr massearmer Stern mit etwa 8 % der Sonnenmasse, während das Sekundärobjekt (Spektraltyp L1.5) mit einer Masse von 6.6 % der Sonnenmasse (entsprechend 69 Jupitermassen) ganz klar substellar ist. Aufgrund der in beiden L-Zwergen nachgewiesenen H α -Strahlung wurde das Alter des Systems auf 150 bis 500 Millionen Jahre geschätzt.

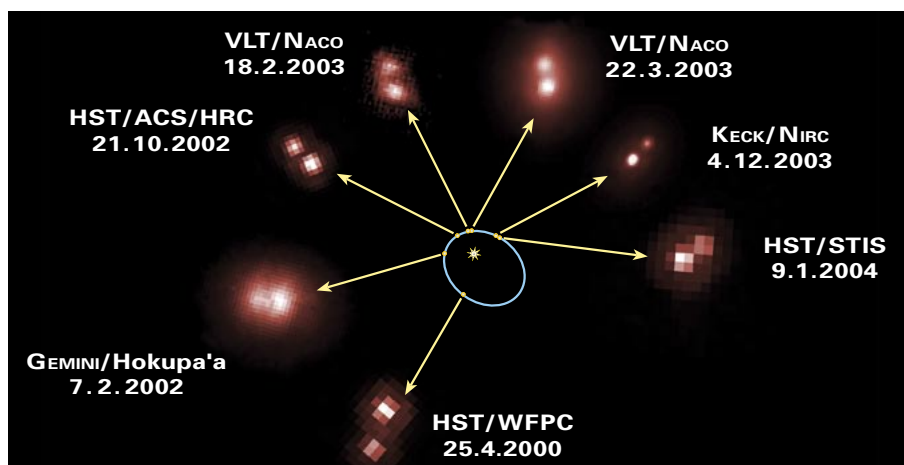


Abb. III.1.6: Beobachtungen der Umlaufbewegung des L-Zwerg-Doppelsystems 2MASSW J0746425+2000321 über einen Zeitraum von vier Jahren. Jeder Punkt auf der Ellipse entspricht einer Messung mit einem bodengebundenen 8-m- bis 10-m-Teleskop oder dem HUBBLE-Weltraumteleskop.

Der Vergleich mit Entwicklungsmodellen, erstellt von Isabelle Baraffe und ihrer Gruppe in Lyon, zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen, wenn auch der durch Vergleich mit DUSTY-Modellen abgeleitete Wert für die Schwerebeschleunigung an der Oberfläche des Braunen Zwergs zu hoch erscheint.

In jüngster Zeit haben Wissenschaftler am MPIA, zusammen mit Laird Close vom Steward Observatory in Tucson, USA, das ~ 40 Millionen Jahre alte Vielfachsystem AB Doradus beobachtet. Aufgrund astrometrischer VLBI-Daten und Messungen mit dem HIPPARCOS-Satellit war bereits bekannt, dass es einen massearmen Begleiter besitzt. Mittels differentieller Aufnahmen mit hohem Kontrast, die mit adaptiver Optik am VLT gewonnen wurden, gelang es diesem Team zum ersten Mal, diesen Begleiter – AB Dor C – direkt abzubilden und ein Spektrum aufzunehmen, das auf den Spektraltyp M8 hinweist. Aus der Kombination der Daten ergibt sich eine dynamische Masse von etwa $87 M_{\text{Jupiter}}$. Nach dem Vergleich mit theoretischen Entwicklungsmodellen scheint dieses Objekt eine um einen Faktor von etwas mehr als Zwei zu geringe Leuchtkraft zu haben. Anders ausgedrückt: für dieses relativ junge Alter unterschätzen die Modelle die Masse eines Objekts gegebener Leuchtkraft um einen Faktor Zwei. Folglich könnten einige sehr kühle Objekte, die als »Objekte mit planetarer Masse« bezeichnet wurden, in Wirklichkeit größere Massen haben.

Gibt es da draußen irgendwelche Planeten?

Ein Zufallsfund bei unserer Suche nach jungen Gasplaneten mit Hilfe des neuartigen Spectral Differential Imager (Gerät für spektrale differentielle Abbildungen) am

NACO-Instrument am VLT war die Entdeckung, zusammen mit Mark McCaughrean (AIP, jetzt in Exeter), dass Eps Ind B, der uns am nächsten gelegene T-Zwerg, ebenfalls ein Doppelsystem ist. Beide Einzelkomponenten zeigen eine Methanatmosphäre und gehören zur Spektralklasse T1 bzw. T6, entsprechend ihren Effektivtemperaturen von etwa 1250 K bzw. 800 K (Abb. III.1.7). Die besten Massenabschätzungen, abgeleitet aus dem Vergleich mit theoretischen Entwicklungswegen, ergeben Massen von 44 und 28 Jupitermassen. Somit liegt die masseärmere Komponente von ϵ Indi B nur einen Faktor 2 über der massengrenze zwischen Gasplaneten und Braunen Zwergen.

Unsere andauernde Überwachung der Bahnbewegungen von BZ-Doppelsystemen sollte in naher Zukunft Massenabschätzungen für eine größere Zahl von Braunen Zwergen und damit noch strengere Einschränkungen für theoretische Struktur- und Entwicklungsmodelle Brauner Zwerges liefern. Überdies haben wir kürzlich ein HST-Programm begonnen, das nach Begleitern mit planetarer Masse um die zwölf nächstgelegenen, isolierten, jungen L-Zwerge sucht, und wir haben auch das erste L/T-Zwerg-Dreifachsystem identifiziert: DENIS-P J020529.0-115925.

Atmosphären Brauner Zwerges

Die Atmosphären Brauner Zwerges sind sehr kühl, so dass sich dort viele Moleküle gebildet haben und sogar feste und flüssige »Staub«-Teilchen aus der Gasphase auskondensieren. Dies führt zu zwei drastischen Effekten. Erstens wird die Zustandsgleichung der Atmosphäre durch die Erhöhung der mittleren Molekülmasse verändert. Zweitens ändern sich die Opazitäten, was zur Folge hat, dass sich das Spektrum sehr drastisch ändert. Wasser (und bei niedrigeren Temperaturen Methan) erzeugen tiefe Absorptionsbanden, während der Staub zu einer Rückerwärmung führt, die einen Großteil des Flusses in den Nahinfrarotbereich des Spektrums umverteilt. Sehr breite Linien neutraler Alkalimetalle beeinflussen ebenfalls das Spektrum. Die Folge ist, dass das Spektrum im optischen und im nahen Infrarot alles andere ist als das eines Schwarzen Körpers.

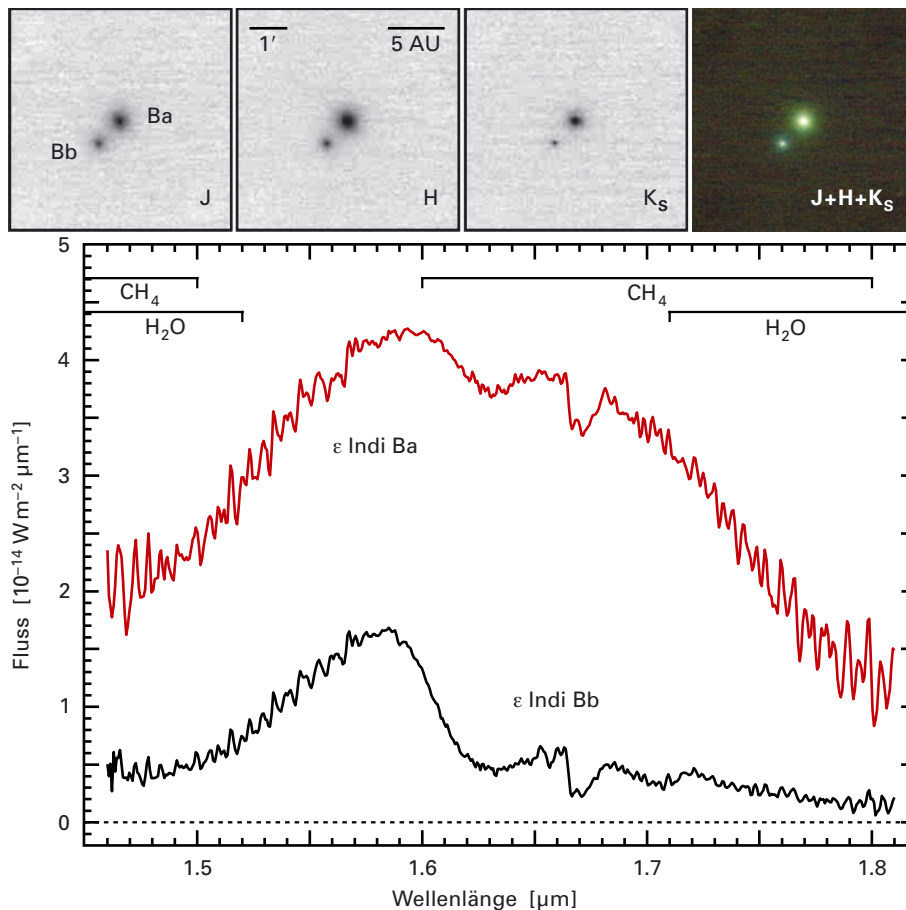


Abb. III.1.7: Direktaufnahmen und Spektroskopie von Epsilon Indi Ba/Bb, dem nächstgelegenen bekannten BZ-Doppelsystem, gewonnen mit beugungsbegrenzter Auflösung im Infrarotbereich mit NACO am VLT. Die Spektraltypen sind T1 bzw. T6.

Staubreiche Braune Zwerge

Insbesondere der Staub ist aus zwei Gründen von großem Interesse. Erstens ist eine geeignete selbstkonsistente Behandlung des Staubs nötig, um Atmosphären von Braunen Zwergen korrekt zu modellieren und ihre beobachteten Spektren zu interpretieren: Nur wenn dies korrekt geschieht, können wir die richtigen Parameter (insbesondere Effektivtemperatur, chemische Häufigkeiten und letztlich auch Alter) ableiten. In der Tat haben neuere Arbeiten, bei denen die Parallaxen und die Flüsse im mittleren Infrarot von Braunen Zwergen gemessen wurden, gezeigt, dass es keine monotone Relation zwischen den oben beschriebenen Spektralklassen L und T und der Effektivtemperatur gibt. Im Allgemeinen bringen wir spätere Spektralklassen mit kühleren Objekten (niedrigeren Effektivtemperaturen) in Verbindung, was für Hauptreihensterne auch zutrifft. Aufgrund des thermochemischen Gleichgewichts würden wir dementsprechend auch erwarten, dass die Sequenz L0, L1, L2, ... T0, T1,

T2 ... immer niedrigeren Temperaturen entspricht. Doch nun sieht es so aus, als ob dem nicht so sei. Speziell beim Übergang von späten L- zu frühen oder mittleren T-Typen (Abb. III.1.8) ist ein Anstieg der Effektivtemperatur zu beobachten. Es scheint in der Tat, dass diese Spektralklassen genauso viel mit den Staubeigenschaften wie mit den Effektivtemperaturen zu tun haben.

Um die Atmosphären Brauner Zwerge zu verstehen, müssen wir demnach den Staub untersuchen. In einer statischen Atmosphäre (in der es keine Konvektion gibt) bilden sich Staubkörner, wachsen und lagern sich gravitativ in Regionen tief im Inneren des Sterns ab (»regnen aus«), wo sie dann nicht länger im Spektrum direkt beobachtbar sind (obwohl das Fehlen von in Staubkörnern eingeschlossenen Elementen beobachtet würde). Im Gegensatz dazu sorgt in einer dynamischen Atmosphäre aufwärts gerichtete Konvektion für einen Auftrieb, der dem Niederregnen entgegen wirkt, und wirbelt abgesunkene Elemente wieder nach oben in die sichtbare Atmosphäre, wodurch die staubreiche Zusammensetzung erhalten bleibt. Konvektion ist ein komplexer Prozess und wird von der Rotation beeinflusst. Daher ist der Staub möglicherweise nicht gleichmäßig über die Oberfläche des Braunen Zwerge verteilt. Es könnten Bänder vorhanden sein, wie wir sie auf Jupiter sehen, oder großräumige, vergängliche Wolken, die selbst ungleichmäßig verteilt sein könnten.

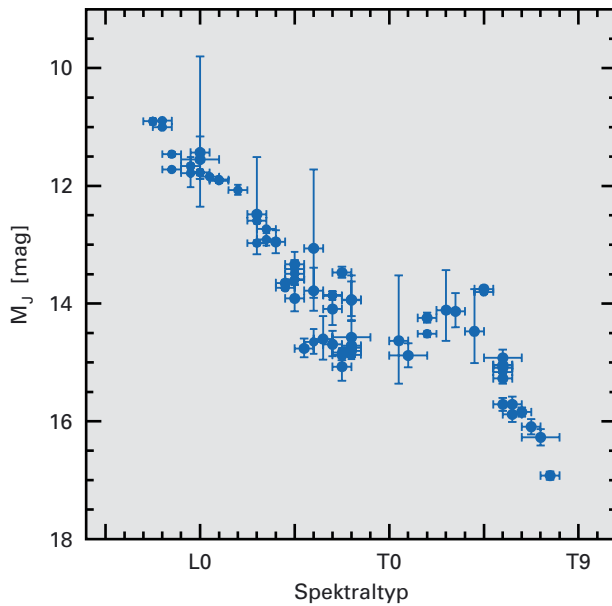


Abb. III.1.8: Absolute J-Band-Helligkeit (M_J) als Funktion der Spektralklasse. Absolute Helligkeiten wurden mit Hilfe von Parallaxenmessungen des US Naval Observatory aus scheinbaren Helligkeiten abgeleitet. Verfolgt man die Spektralsequenz nach unten, sieht man, dass die J-Band-Helligkeit ansteigt, wenn man von den späten L- zu den frühen oder mittleren T-Typen übergeht. Dies hängt vermutlich mit der Auflösung von Staubwolken bei diesen geringen Temperaturen zusammen.

Die Veränderung der Wolken wird überwacht

Obwohl wir die Oberfläche eines Braunen Zwergs (noch) nicht auflösen können, könnten wir derartige ungleichmäßige Gebilde anhand von Veränderungen des Gesamtlichts nachweisen, das der Braune Zwerg in unsere Richtung ausstrahlt. Staub ist eine starke Opazitätsquelle und verändert deutlich das emittierte Spektrum. Während der Braune Zwerg rotiert, könnte sich die Gesamtmenge des Staubs auf der sichtbaren Hemisphäre ändern, sodass sich auch die vom Braunen Zwerg in unsere Richtung ausgesandte gesamte Lichtmenge entsprechend ändert. Mit anderen Worten, wir würden in jenen Teilen des Spektrums, die vom Staub beeinflusst werden, eine periodische Helligkeitsänderung des Braunen Zwergs beobachten.

Dies veranlasste Coryn Bailer-Jones zusammen mit Reinhard Mundt (ebenfalls MPIA), eine Reihe Brauner Zwerge in roten und infraroten Filtern zu überwachen, um nach Helligkeitsvariationen zu suchen. Bei einer anfänglichen Stichprobe von 20 Objekten stellten wir fest, dass die Hälfte tatsächlich statistisch signifikante photometrische Schwankungen zeigt, allerdings mit sehr geringen Amplituden zwischen 0.5 und 8 % (Abb. III.1.9). Einige dieser Schwankungen waren periodisch, mit Perioden von wenigen Stunden. Doch in einigen Fällen waren sie nichtperiodisch. Dies war merkwürdig.

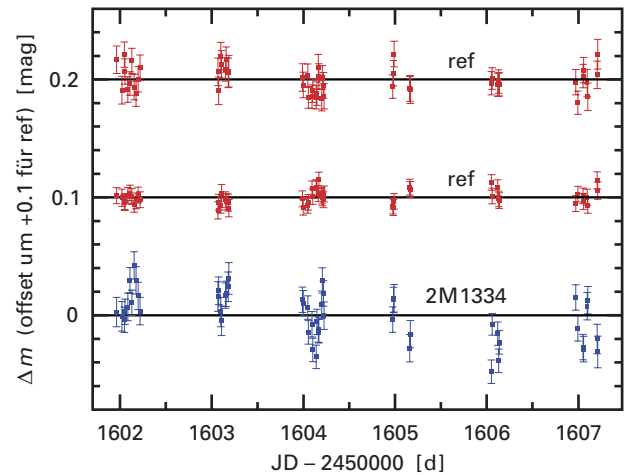


Abb. III.1.9: Die blauen Punkte zeigen die Helligkeitsschwankungen des L1.5-Zwergs 2M1334+19 im I-Band. Die roten Punkte zeigen Schwankungen von gleichzeitig im selben Feld beobachteten Vergleichssterne. Ihre Lichtkurven sind um 0.1 bzw. 0.2 mag verschoben worden. Man beachte, dass dies relative Schwankungen sind, d.h. Schwankungen relativ zu einer Gruppe nichtveränderlicher Sterne. Auf diese Weise werden unechte, von der Erdatmosphäre verursachte Schwankungen beseitigt. Für alle Punkte sind Fehlerbalken (geschätzte Unsicherheiten) eingezeichnet. (Der untere Vergleichssterne ist heller als der L-Zwerg, hat also kleinere Fehlerbalken; der obere Vergleichssterne hat eine ähnlich Helligkeit wie der L-Zwerg.) Man erkennt beim L-Zwerg größere Amplitudenschwankungen als bei den beiden (oder irgendwelchen anderen) Vergleichssterne, was darauf hindeutet, dass die Schwankungen vom L-Zwerg selbst herrühren. Statistische Tests bestätigen dies.

Könnte es sein, dass diese Braunen Zwerge sehr langsam rotierten, sodass unsere begrenzte Beobachtungsdauer noch nicht einmal eine einzige Rotationsperiode überdeckt hatte? Um dies zu überprüfen, maßen wir mit Hilfe des hochauflösenden Spektrographen UVES am VLT die Rotationsgeschwindigkeiten einiger Brauner Zwerge. Rotation verbreitert die Spektrallinien. Durch eine sorgfältige Messung der Linienbreite kann man somit die Rotationsgeschwindigkeit messen. (Tatsächlich liefern die Beobachtungen wegen der unbekannten Neigung der Rotationsachse nur eine untere Grenze für die Rotationsgeschwindigkeit. Doch mit Hilfe einfacher statistischer Überlegungen kann man die wahrscheinlichste Rotationsgeschwindigkeit abschätzen und auch die maximale Rotationsgeschwindigkeit einschränken.) Die Beobachtungen zeigten, dass unsere Braunen Zwerge sehr rasch rotieren, d.h. unsere Überwachung hätte eine Periodizität in den Helligkeitsschwankungen entdecken müssen. Immerhin hatten wir eine deutliche Variabilität beobachtet. Warum also keine Periode? Die wahrscheinlichste Erklärung ist, dass die Schwankung nichtperiodisch ist. Das bedeutet, dass die Gebilde auf der Oberfläche des Braunen Zwergs zeitlich nicht stabil sind, genauer, sie sind weniger als eine Rotationsperiode lang stabil. Wir

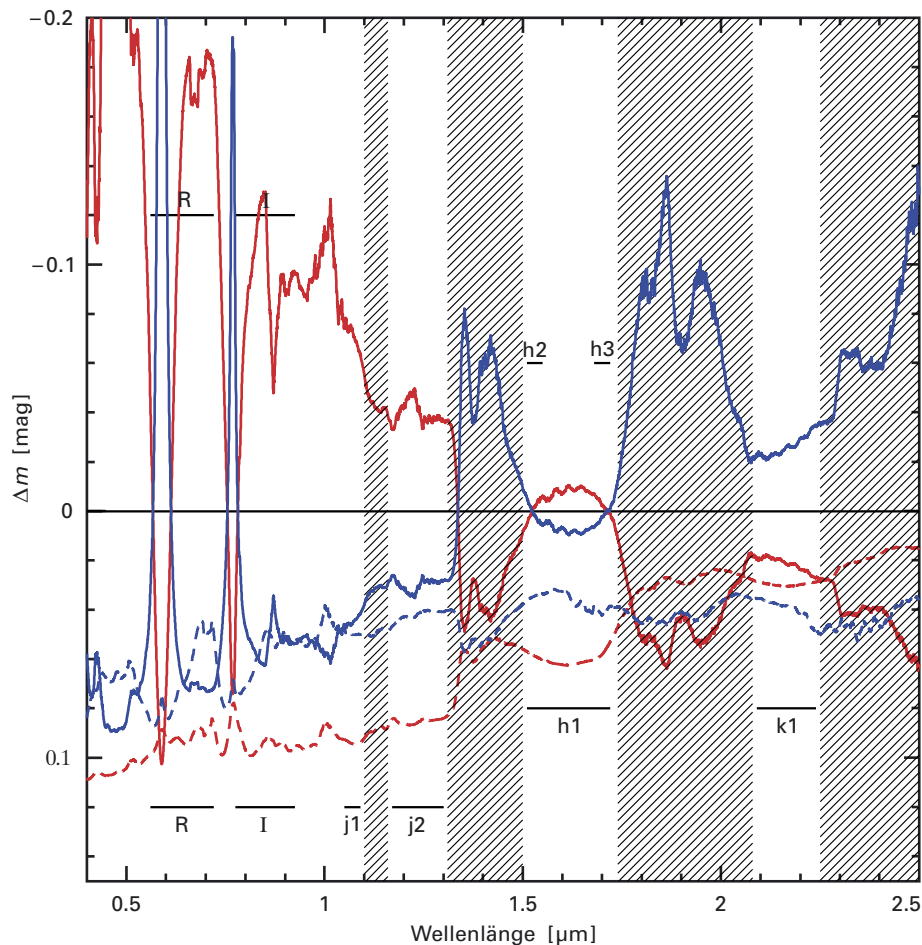


Abb. III.1.10: Die durchgezogenen und gestrichelten Linien zeigen die Änderungen im Spektrum, die wir aufgrund der Variabilität verschiedener Arten von Staubwolken oder kühlen Flecken beobachten würden, die 10 % der Oberfläche eines ultrakühlen Zwergs (1900 K Effektivtemperatur, in etwa einem frühen L-Zwerg entsprechend) bedecken. Dies sind theoretische Vorhersagen, beruhend auf Atmosphärenmodellen und synthetischen Spektren von France Allard und Mitarbeitern. Die vier gezeigten Linien entsprechen den folgenden Fällen.

Ein staubfreies Loch auf einer staubreichen Atmosphäre (rote durchgezogene Linie) und ein staubreicher aber kühlerer Flecken auf derselben Atmosphäre (rote gestrichelte Linie); eine Staubwolke auf einer staubfreien Atmosphäre (blaue durchgezogene Linie) und ein staubfreier aber kühlerer Fleck auf derselben Atmosphäre (blaue gestrichelte Linie). Die grauen Bänder zeigen Spektralbereiche, die vom Erdboden aus wegen der Absorption durch unsere eigene Atmosphäre schwer zu beobachten sind.

wissen, dass dies vorkommen kann: Auf der Sonne verändern sich die Sonnenflecken im Laufe der Zeit, wobei sie typischerweise nur etwa eine Rotationsperiode lang stabil sind. Könnte dies auf Braunen Zwergen auch so sein? Und was sind diese Oberflächengebilde? Sind es wirklich Staubwolken?

Um den physikalischen Grund für diese Schwankungen zu untersuchen, haben wir ein Programm zur spektroskopischen Überwachung einer Reihe Brauner Zwerge begonnen. Mit Hilfe neuester Atmosphärenmodelle für Braune Zwerge haben wir Vorhersagen über die Art der Veränderungen getroffen, die wir aufgrund der Änderungen im Staub quer durch das Spektrum erwarten. Die bedeutsamsten Veränderungen treten im nahen Infrarot auf (Abb. III.1.10). Diese nachzuweisen ist

jedoch wegen der Veränderungen in der Erdatmosphäre, durch die hindurch wir die Sterne beobachten, und aufgrund instrumenteller Effekte noch recht schwierig; beides muss bei der Datenauswertung berücksichtigt werden. Dennoch sind unsere ersten Ergebnisse interessant. Sie zeigen Hinweise auf merkbare Variabilität in einer ganzen Reihe von spektralen Bereichen.

Überdies sind einige dieser Veränderungen miteinander korreliert, was darauf hindeutet, dass sie wahrscheinlich von den Braunen Zwergen selbst herrühren und kein Beobachtungsartefakt sind. Eine genauere Untersuchung ist noch im Gange, und sichere Schlussfolgerungen werden erst nach weiteren Beobachtungen möglich sein. Darüber hinaus ist es wegen der Komplexität der beteiligten physikalischen Prozesse schwierig, eindeu-

tige Schlüsse zu ziehen. Ein Atmosphärenmodell, das Strahlungstransport, Staubbildung und Konvektion beinhaltet, ist höchst komplex (tatsächlich gibt es noch kein solches selbstkonsistentes Modell). Daher ist es nicht möglich, durch eine begrenzte Anzahl von Beobachtungen Einschränkungen für alle Teile eines solchen Modells zu bestimmen. Um irgendwelche Schlüsse ziehen zu können, müssen wir daher gewisse Annahmen machen. Doch bislang scheinen unsere Daten Veränderungen von Staubwolken bei Braunen Zwergen zu stützen.

Ausblick

Die Erforschung Brauner Zwerge durchlebt gerade aufregende Zeiten. Sie begann mit den ersten theoretischen Vorhersagen in den 1960ern, gefolgt von detaillierten Modellrechnungen und der Entdeckung möglicher Kandidaten Ende der 1980er und Anfang der 1990er und schließlich der sicheren Identifikation der ersten Braunen Zwerge 1995. Im Laufe der vergangenen zehn Jahre gab es enorme Fortschritte bei ihrem Nachweis und bei ihrer Charakterisierung mittels Beobachtungen, wie auch Fortschritte auf dem theoretischen Sektor, bei der Berechnung von Entwicklungs- und Atmosphärenmodellen. Ein Teil der spannendsten Untersuchungen finden im mittleren Infrarot statt, zum Beispiel mit dem Weltraumteleskop SPITZER, das von unschätzbarem Wert ist für die Erkundung zirkumstellarer

Scheiben sowie der Entstehung Brauner Zwerge und ihre ersten Entwicklungsstadien: Dies wird von entscheidender Bedeutung sein bei der Beurteilung, wie viel diese mit der Sternentstehung gemein haben. Ebenso geben uns hochaufgelöste Direktaufnahmen im nahen Infrarot Aufschluss über die Doppelsternnatur Brauner Zwerge und die Statistik massearmer Begleiter, darunter auch Objekte mit vielleicht nur einigen Jupitermassen, die recht wohl Planeten sein können. Tiefe Durchmusterungen mit Weitwinkelkameras werden weiterhin große und lichtschwächere Populationen im galaktischen Feld und in mehr Sternhaufen aufspüren. Somit wird es uns möglich sein, die Entwicklung Brauner Zwerge und den Einfluss der Umgebung auf diese Entwicklung zu untersuchen. Theoretische Fortschritte bei Modellrechnungen von Staubwolken werden uns erlauben, die beobachteten Spektren besser zu interpretieren; und genauere Beobachtungen, darunter Überwachungen und hochauflösende Spektroskopie, werden weitere Erkenntnisse über ihre kühlen, komplexen Atmosphären liefern.

Und während die Beobachtungen zu immer schwächeren und masseärmeren Objekten vordringen, könnten wir schon bald eine neue Spektralklasse jenseits der kühlest T-Zwerge benötigen, für jene Objekte mit ähnlichen Temperaturen wie Jupiter. Braune Zwerge haben wahrlich aufregende Zeiten vor sich.

*(Coryn Bailer-Jones, Wolfgang Brandner,
Thomas Henning, Rainer Lenzen, Stefan Umbreit)*

III.2 Staub im Computer: Numerisches zur Entstehung von Planeten

Teleskope sind das klassische Arbeitsmittel der Astronomen. Doch man kann nicht alle Vorgänge am Himmel durch Beobachtung alleine verstehen. Wichtige Prozesse, wie zum Beispiel die Entstehung von Planeten aus der Zusammenlagerung mikroskopischer Staubkörner, verschließen sich der direkten Beobachtung. Hier kommen Computersimulationen ins Spiel, die von ihren Entwicklern auch gerne »numerische Teleskope« genannt werden. Am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg werden eine Vielzahl solcher Werkzeuge entwickelt und erfolgreich bei der Planung und Interpretation von Beobachtungen auf dem Gebiet der Planetenentstehung eingesetzt.

Astronomie am Teleskop und am Computer

Die Untersuchung des Prozesses der Sternentstehung war einer der Schwerpunkte der astrophysikalischen Forschung der letzten zwanzig Jahre. Im Fall sehr massereicher Sterne mit Massen oberhalb von zehn Sonnenmassen sind noch viele Fragen unbeantwortet. Dies liegt vor allem an der relativen Seltenheit und der kurzen Dauer ihrer Entstehung, was ihre Beobachtbarkeit stark einschränkt. Für die viel häufigeren Sterne mittlerer und geringer Masse ist inzwischen jedoch ein sehr gutes Verständnis der wichtigsten Prozesse der Sternentstehung erreicht worden. Sterne dieses Massenbereiches sind vor allem deshalb von herausragender Bedeutung, da sich an ihnen beispielhaft die Entwicklung unseres eigenen Sonnensystems und damit die Entstehung von Planeten wie Jupiter, aber auch die unseres Heimatplaneten Erde studieren lässt.

Astronomie umfasst immer zwei Teilbereiche, welche Hand in Hand gehen müssen. Einerseits muss der beobachtende Astronom Sterne und andere kosmische Objekte in ihren Strahlungserscheinungen vermessen. Andererseits muss der theoretische Astrophysiker diese Beobachtungen mit auf der Erde experimentell bestimmten Naturgesetzen zu erklären suchen. Schon Mitte des letzten Jahrhunderts zeigte sich, dass sich beispielsweise die Entwicklung eines Sterns nicht als Ergebnis einer einfachen Gleichung niederschreiben lässt. Aufwendige numerische Simulationen auf den damaligen noch mit Röhren bewaffneten Großrechnern waren notwendig und man freute sich als man es schaffte, die verschiedenen Entwicklungsstadien von Sternen im Computer mit den Beobachtungen von echten Sternen in Übereinstimmung zu bringen. Alles, was wir heute über Masse, Zusammensetzung und Alter eines Sterns wissen, stammt aus solchen ausgefeilten numerischen Experimenten.

Die Entdeckung des ersten extrasolaren Planeten bei einem sonnenähnlichen Stern mit dem Namen 51 Pegasi im Jahre 1995 war ein echter Schock für die Theoretiker. Was man damals fand, war ein Gasriese von der Größe Jupiters auf einer Umlaufbahn näher am Zentralstern, als Merkur an der Sonne! Hatte man bis dato die Modelle zur Planetenentstehung an den Gegebenheiten in unserem Heimatsystem ausgerichtet, so musste man nun umdenken. Bei uns befinden sich die erdähnlichen Planeten auf niedrigen Umlaufbahnen, und die Gasriesen wie Jupiter und Saturn umlaufen die Sonne weit draußen in großer Entfernung. Dies erschien natürlich, da es während der Planetenentstehung nah an der Sonne stets wärmer war als weiter außen. Jupiter, welcher fünfmal so weit von der Sonne entfernt ist wie die Erde, befindet sich jenseits der sogenannten »Schneegrenze«. Das ist die Entfernung von der Sonne, ab der das Gas und der Staub, aus dem die Planeten entstehen, so kalt sind, dass Moleküle wie zum Beispiel Wasser ausfrieren können, wodurch sich die zur Verfügung stehende Materialmenge zur Entstehung von Jupiter beträchtlich erhöht. Die Beobachtungsfakten, also die kleinen Planeten Venus, Erde und Mars innen und die weit massereicheren Planeten Jupiter, Saturn und die Eisplaneten Uranus und Neptun weit außen, wurden als allgemein gültig angesehen und waren Grundlage aller Erklärungsversuche von Kant und Laplace über Weizsäcker und Savronov bis hin zu den modernen, auf detaillierten Computersimulationen beruhenden Modellen der letzten Jahre von Pollack und Boss. In all diesen Modellen geht man davon aus, dass die junge Sonne einst von einem Gas- und Staubgemisch umgeben war, welches ähnlich den Saturnringen in einer flachen Scheibe um den Stern verteilt war. Ausdehnung und Umlaufgeschwindigkeiten entsprechen dabei dem heutigen Sonnensystem. Die Modelle unterscheiden sich lediglich darin, wie die Planeten im Einzelnen aus diesem Urnebel auskondensierten.

Was nun den meisten Theoretikern seit der Entdeckung von 51 Pegasi b immense Kopfschmerzen breitet, nämlich zu erklären, warum es massereiche Gasriesen auf niedrigen Umlaufbahnen, so genannte »Heiße Jupiter«, geben kann, war für zumindest einige wenige Forscher eine große Freude. Hatten sie doch schon in den 80er Jahren eine radiale Wanderung von jungen Planeten proklamiert. Diese Wanderung resultiert aus der Wirkung der Schwerkraft des Planeten auf die Gas- und Staubscheibe sowie auf der entsprechenden Rückwirkung auf den Planeten. Dieser Theorie wurde zunächst wenig Beachtung geschenkt, da man ja in unserem Planetensystem keinerlei Hinweise auf eine solche Wanderung fand. Unsere Planeten scheinen sich alle da zu befinden, wo sie auch einst entstan-

den sind. Seit der Entdeckung vieler solcher heißen Jupiter ist die Anzahl der Publikationen zum Thema Planetenwanderung exponentiell angestiegen. Waren dies früher Arbeiten mit einfachen analytischen Modellen, so werden heutzutage Höchstleistungsrechner mit hoch aufgelösten dreidimensionalen Modellen beschäftigt, die alle Effekte von der Gasdynamik der planetaren Scheibe über die Ausbreitung der Strahlung im Staubplasma bis hin zum Einfluss von Magnetfeldern zu berücksichtigen suchen. Am MPIA sind auf diesem Gebiet in den letzten Jahren entscheidende Arbeiten entstanden, auf die wir im Folgenden noch zurückkommen werden. Doch zunächst zurück zur Beobachtung.

Planetenentstehung ist Teil der Sternentstehung

Im Gegensatz zu früheren Forschungsansätzen auf dem Gebiet der Planetenentstehung kann man heute, und gerade am MPIA, auf den Kenntnissen aufbauen, die im Rahmen der Sternentstehungsforschung gesammelt wurden. Auch kann man die Beobachtungsverfahren übernehmen, denn genauso wie vorher die Studien zur Sternentstehung, profitieren die Untersuchungen zur Planetenentstehung von der enormen Entwicklung im Bereich der Infrarotbeobachtungstechnik seit den 80er Jahren.

Warum? Die Antwort liegt in der Natur des Verbindungsgliedes zwischen der Stern- und der Planetenentstehung – der zirkumstellaren Scheibe. Dies ist die Gas- und Staubscheibe, welche sich in Folge der Drehimpulserhaltung beim Einfall der Materie aus der Muttermolekülwolke um den jungen Protostern ausbildet. Diese Scheiben weisen nach unseren Beobachtungen typischerweise einen Durchmesser von wenigen hundert Astronomischen Einheiten und eine Masse von typischerweise $1/_{100}$ der Sternmasse auf. (Eine Astronomische Einheit ist definiert als die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne.) Obwohl der Staub – es handelt sich hierbei um ursprünglich submikrometergroße Partikel – nur etwa $1/_{100}$ der gesamten, vom Gas dominierten Scheibenmasse ausmacht, so ist er doch wegen seiner optischen Eigenschaften für die Beobachtbarkeit der Scheibenstruktur besonders wichtig. Das Gas allein ist weitestgehend durchsichtig. Was man beobachtet, ist also hauptsächlich der Staub. Zum einen erlaubt uns die am Staub gestreute Sternstrahlung die äußere Gestalt der Scheiben zu beobachten. Zum anderen lässt die Wärmestrahlung des Staubes Aussagen über die innere Struktur der Scheiben zu. Entsprechend der Staubtemperaturen von bis zu 1500 Kelvin am Innenrand der Scheibe, also nahe am Stern, bis hin zum kalten Staub in den äußeren Regionen, kann man die vom Staub emittierte Strahlung vom nahen Infrarot bis in den Millimeterwellenlängenbereich untersuchen.

Die Absorptions- und Emissionseigenschaften eines einzelnen Staubkorns lassen sich experimentell in Abhängigkeit von seiner chemischen und struktu-

rellen Zusammensetzung sowie seiner Größe bestimmen. Die Bestimmung der kombinierten Eigenschaften all der unzähligen Staubkörner unterschiedlicher Zusammensetzung und Größe, welche die protoplanetare Scheibe bilden, benötigt nun jedoch den Einsatz komplizierter Berechnungen mit leistungsfähigen Computern. Am MPIA stehen eine Reihe dieser numerischen Werkzeuge zur Verfügung, wie zum Beispiel das dreidimensionale Strahlungstransportprogramm von Sebastian Wolf. Es handelt sich um ein Programm nach dem so genannten Monte-Carlo-Verfahren. Das bedeutet nicht, dass man zur erfolgreichen Bedienung des Programms besonders viel Glück benötigt, sondern dass ein Zufallselement zur Erreichung statistisch guter Ergebnisse in den Algorithmus einbezogen wurde.

Die Funktionsweise des Programms ist recht anschaulich. Wie bei »echten« Sternen werden die Photonen von der Sternoberfläche aus in zufällig ausgewählte Richtungen in die umgebende zirkumstellare Scheibe ausgesandt. Dort können die Photonen an den Staubkörnern gestreut, aber auch von ihnen absorbiert werden, wodurch sich die Scheibe erwärmt – genau wie in der Realität. Nach mehr oder weniger komplizierten Pfaden durch die Scheibe können die Photonen das Stern-Scheibe-System verlassen und mit im Computer nachgebildeten Teleskopen beobachtet werden. Simulationen mit Millionen oder gar Milliarden solcher Photonen erlauben es dann, Bilder zu erstellen und andere Beobachtungsgrößen abzuleiten. Je nachdem, welches Teleskop man nun in den Rechner steckt, lassen sich Bilder erzeugen, wie sie das Weltraumteleskop HUBBLE sehen würde, oder spektrale Energieverteilungen, wie sie die am MPIA mitentwickelten Satelliten ISO oder das Weltraumteleskop SPITZER messen könnten. Neben der Interpretation von bereits vorliegenden Beobachtungen erlaubt es das Teleskop im Computer auch Beobachtungen mit zukünftigen Geräten zu planen, sei es das im Bau befindliche (Sub)millimeter-Interferometer ALMA (Atacama Large Millimeter Array) oder das zukünftige 100-m-Großteleskop OWL (OverWhelmingly Large Telescope).

Im Computer lassen sich nun die Staubeigenschaften ändern und damit die Auswirkungen auf die Beobachtung studieren. Im Umkehrschluss kann man danach an Hand von Beobachtungsdaten ablesen, wie sich die Staubeigenschaften von einer beobachteten zirkumstellaren Scheibe zur nächsten ändern. Ähnlich wie eingangs im Fall der Sternentwicklung, hoffen wir auf diese Weise etwas über die Entwicklung zirkumstellarer Scheiben zu Planetensystemen zu lernen.

Staub wächst zu Planeten...

Der Staub in zirkumstellaren Scheiben hat noch eine wesentlich wichtigere Bedeutung als nur für die Beobachtbarkeit der Scheiben zu sorgen: Man geht heut-

zutage davon aus, dass er das Ausgangsmaterial für die Entstehung aller Planeten darstellt. In diesem Zusammenhang spricht man statt von zirkumstellaren auch oft von »protoplanetaren« Scheiben.

Wie kommt man aber von Staubkörnern mit Radien von Submikrometergröße zu Planeten mit Durchmessern von mindestens einigen tausend Kilometern? Man nimmt an, dass dieser Prozess über drei qualitativ verschiedene Zwischenphasen verläuft.

In der ersten Phase wachsen aus den mikroskopischen Staubpartikeln Körper mit Radien im Zentimeterbereich. Der hierbei dominierende Prozess nennt sich Koagulation, d.h. das einfache und – entsprechend den Ergebnissen aus Laborexperimenten – sehr effektive Aneinanderhaften der kleinen Staubpartikel. Voraussetzung dafür ist, dass die kleinsten Staubpartikel sich aufgrund der Brownschen Molekularbewegung relativ zueinander bewegen. Die Haftung wird bei diesen kleinen Partikeln durch Oberflächenkräfte erzeugt und benötigt keinen speziellen Klebstoff. Weitere wichtige physikalische Prozesse während dieser Wachstumsphase sind das Absinken der größeren Partikel zur Scheibenmittelebene (»Sedimentation«), radiale Transportprozesse (Drift- und Mischungsprozesse) sowie Turbulenz in der Scheibe. Diese gesamte Phase verläuft wahrscheinlich sehr schnell: in nur zehn- bis hunderttausend Jahren.

Das weitere Wachstum hin zu kilometergroßen Körpern über ähnlich einfache Koagulation ist unwahrscheinlich. Weder experimentelle Daten noch theoretische Modelle können derzeit dieses Wachstum schlüssig erklären. Weder ist bekannt wie zwei faustgroße Steine aneinander haften sollen, noch wissen wir, inwieweit sich metergroße Felsen bei einer Kollision nicht wieder in Staub auflösen. Als theoretische und computergestützte Alternative bietet sich ein Gravitationskollaps an. Ähnlich wie einst der Stern aus einer Molekülwolke entstand, können die kilometergroßen, Planetesimale genannten Brocken auch bei einem Gravitationskollaps einer Wolke aus metergroßen Felsen entstehen. Die entsprechenden Computersimulationen sind Gegenstand der aktuellen Forschung, auch am MPA.

Eine zweite Wachstumsphase beginnt, sobald sich Planetesimale von 1 bis 10 km Größe gebildet haben. Die größten dieser Körper können über gravitative Wechselwirkung kleinere aufsammeln. Diese Phase ist durch ein schnelles Wachstum einiger weniger großer Körper geprägt und wird daher auch als »oligarchisches« Wachstum bezeichnet. Man vermutet, dass nach einigen Millionen Jahren terrestrische Planeten oder die Kerne späterer Riesenplaneten entstanden sind. Auf letztere wird im Laufe der dritten und damit abschließenden Phase Gas aus der Scheibe akkretiert – und die Gasriesen sind geboren.

Sowohl die Entstehung der Planetenkerne als auch die Akkretion des Gases kann seit langem im Computer abgebildet werden. Ein großes Problem stellen jedoch die

Zeitskalen dar, welche der Computer für diese Prozesse vorhersagt. Unter günstigen Voraussetzungen dauert jeder einzelne Prozess wohl zehn Millionen Jahre, was bei einer aus Beobachtungen geschätzten Lebenserwartung der Protoplanetaren Scheiben von weniger als zehn Millionen Jahren als zu lang erscheinen muss. So versucht man immer detailliertere Modelle in den Computer zu stecken, mit immer mehr relevanten physikalischen Effekten, die den Planetenentstehungsprozess beschleunigen. Es sei noch erwähnt, dass in einem alternativen Entstehungsszenarium die Gasplaneten, ähnlich wie zuvor der Stern im Zentrum, direkt aus der Gasphase des Urnebels durch Gravitationskollaps in kürzester Zeit entstehen. Doch haben auch hier die numerischen Simulationen kein eindeutiges Ergebnis erbracht.

... und wird dabei beobachtet!

So weit die theoretischen Vorhersagen. Welche Möglichkeiten haben wir, neben Laborexperimenten für das Wachstum kleinster Partikel, dieses Bild zu überprüfen? Zum einen kann man simulieren, wie sich die optischen Eigenschaften des Staubes während seiner Entwicklung verändern und gezielt nach diesem größeren Staub suchen. Zum anderen kann man sich überlegen, inwiefern bereits gebildete Planeten auf die zirkumstellare Scheibe rückwirken und dadurch – gegebenenfalls indirekt – nachgewiesen werden können. Auf die zweite Frage werden wir im vorletzten Abschnitt gesondert eingehen.

Wodurch kann man nun kleinen Staub, d.h. submikrometergroße Körner, von Staub mit 100- bis 1000-fach größeren Radien unterscheiden? Hierzu gibt es mehrere Ansätze, die wir kurz vorstellen wollen:

Die spektrale Energieverteilung im (Sub-) Millimeterbereich

Da es nur wenige Bilder räumlich aufgelöster zirkumstellarer Scheiben gibt, kommt der Interpretation der spektralen Energieverteilung eine besondere Rolle zu (Abb. III.2.1). Dummerweise gibt es selbst bei einfachen Scheibenmodellen so viele freie Parameter, dass sich ein eindeutiges Modell nur schwer finden lässt, und damit detaillierte Aussagen bis hin zu den Eigenschaften des Staubes in den Scheiben mit Vorsicht zu genießen sind. Insbesondere wurde festgestellt, dass die spektrale Energieverteilung vieler zirkumstellarer Scheiben bei Wellenlängen größer als 400 Mikrometer schwächer abfällt, als die in interstellaren Wolken gemessene. Man war in der Vergangenheit schnell versucht, dies durch einen verringerten Emissionsexponenten infolge Staubkornwachstums zu erklären. Allerdings ist dieser Ansatz nur gerechtfertigt, wenn die Scheibe in diesem Wellenlängenbereich optisch dünn ist. Ist dies nicht der Fall, so würde allein die zu größeren Wellenlängen hin zunehmende sichtbare Staubmasse den verringerten Abfall der spektralen Energieverteilung erklären.

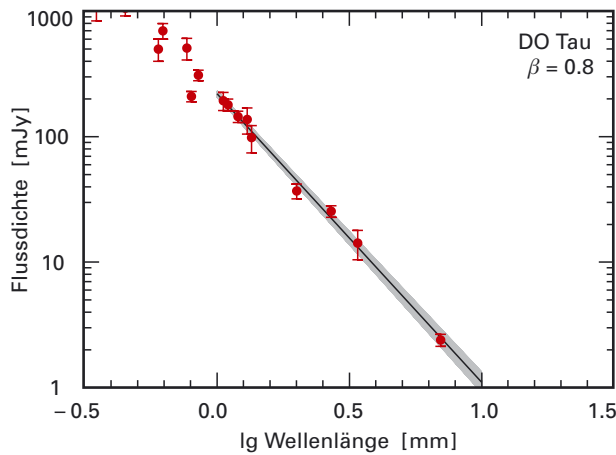


Abb. III.2.1: Spektrale Energieverteilung der zirkumstellaren Scheibe um den T-Tauri-Stern DO Tau im Millimeterbereich. Der relativ flache Abfall des Strahlungsflusses in diesem Wellenlängenbereich kann als Hinweis auf Staubwachstum interpretiert werden. (Rodmann et al.)

Form charakteristischer Staubemissionsbanden

Die prominenteste auch vom Boden aus beobachtbare Festkörper-Emissionsbande ist die 10- μ m-Bande astronomischen Silikats. Wenn Silikatkörner eine Größe von einigen Mikrometern erreichen, besitzt diese Bande eine charakteristische Plateauform, während sie für noch größere Körner gänzlich verschwindet. Mit MIDI, dem Mid infrared Interferometric Instrument, konnte über diesen Effekt Staubkornwachstum speziell im inneren Bereich zirkumstellarer Scheiben nachgewiesen werden.

Polarisation gestreuter Strahlung

Durch Streuung am Staub in den oberen Scheibenbereichen wird die stellare Strahlung polarisiert. Der Betrag des Polarisationsgrades hängt entscheidend von der Teilchengröße ab, so dass mit dieser Technik überprüft werden kann, ob Teilchenwachstum in den oberen Scheibenschichten oder in der zirkumstellaren Hülle eine Rolle spielt.

Räumlich aufgelöste Bilder in verschiedenen Wellenlängenbereichen

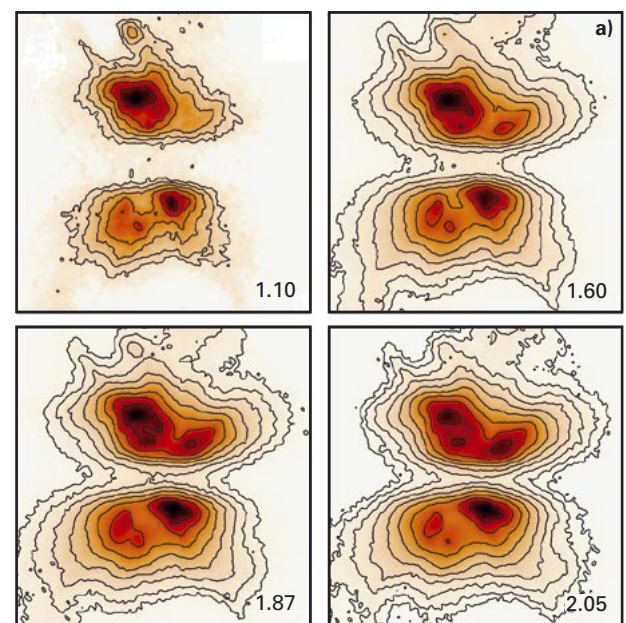
Die bisher stichhaltigste Methode zur Analyse des Staubwachstums in den Scheiben ist die, neben der Kombination der obigen Verfahren räumlich aufgelöste Bilder zirkumstellarer Scheiben einzubeziehen. Wichtig hierbei ist, dass diese Bilder in verschiedenen Wellenlängenbereichen gewonnen werden sollten, um verschiedene Scheibenbereiche und physikalische Prozesse zu berücksichtigen.

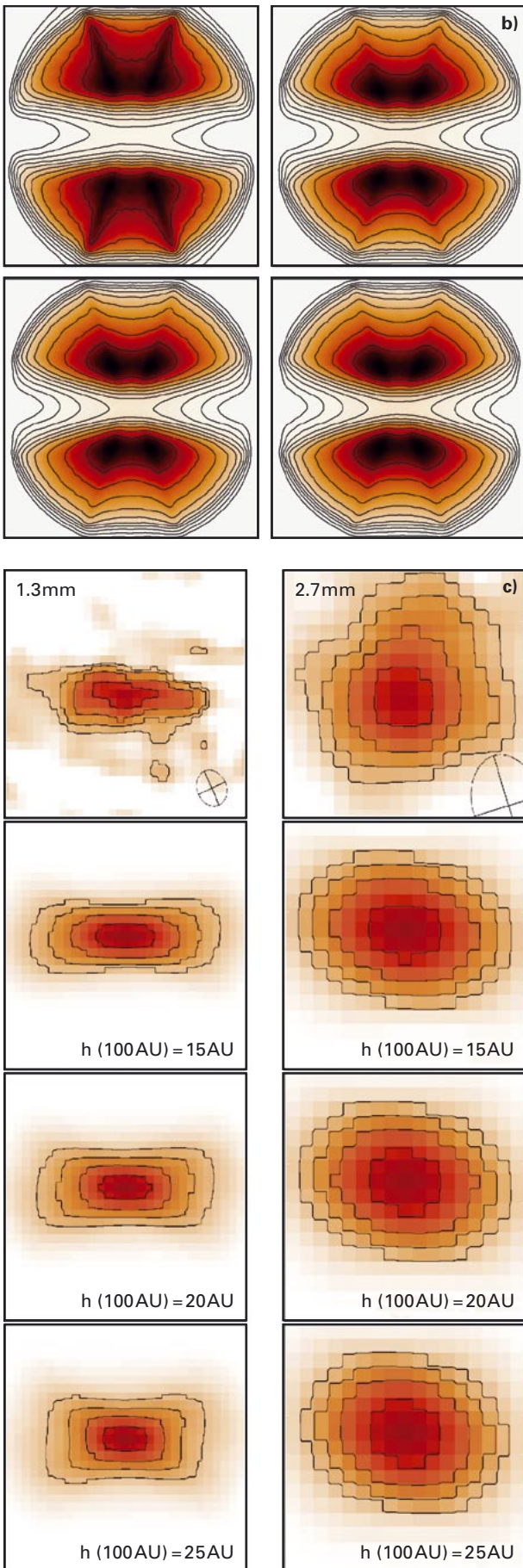
Als Beispiel sollen hier Ergebnisse der prominenten, von der Seite gesehenen Scheibe des Schmetterlingssterns

(»Butterfly Star«) vorgestellt werden. Hochauflösende, im nahen Infrarot mit der Kamera NICMOS am Weltraumteleskop HUBBLE gewonnene Bilder, welche die Scheibenkonturen und die zirkumstellare Hülle im Streulicht zeigen, wurden ebenso herangezogen, wie räumliche aufgelöste Millimeterkarten, die am Owens Valley Radio Observatory (OVRO) gewonnen wurden und die thermische Reemission des Staubes in der dichten Scheibenmittelebene zeigen. Des Weiteren wurden Polarisationskarten im nahen Infrarot und die spektrale Energieverteilung vom mittleren Infrarot bis in den Millimeterbereich bei der Dateninterpretation berücksichtigt. Die Schwierigkeit bestand jetzt darin, ein einziges Modell zu finden, welches alle Beobachtungsbefunde unter einen Hut zu bringen erlaubte.

Für eine derart komplexe Aufgabenstellung sind die bereits erwähnten Strahlungstransportsimulationen unerlässlich. Erst dadurch können Bilder, Spektren und Polarisationskarten für die entwickelten Scheibenmodelle erstellt und mit den Beobachtungsbefunden verglichen werden.

Abb. III.2.2: a) Nahinfrarotaufnahmen der von der Seite gesehenen, prominenten zirkumstellaren Scheibe und Hülle um den Schmetterlingsstern im Taurus (IRAS 04302+2247). Die Aufnahmen wurden mit dem Weltraumteleskop HUBBLE bei den Wellenlängen von 1.10 μ m, 1.60 μ m, 1.87 μ m und 2.05 μ m gewonnen. Deutlich ist die mit zunehmender Wellenlänge scheinbar verringerte Scheibendicke zu erkennen. (rechts) b) Simulierte Streubilder, aus deren Vergleich mit den Beobachtungen die räumliche Struktur, Masse und weitere physikalische Größen des zirkumstellaren Mediums um den Schmetterlingsstern abgeleitet werden konnte. c) Vergleich beobachteter und simulierter Millimeter-Karten der zirkumstellaren Scheibe um den Schmetterlingsstern. (Wolf, Padgett und Stapelfeldt, 2003)





Im Falle des Schmetterlingssterns (Abb. III.2.2) konnte gezeigt werden, dass der Staub in der zirkumstellaren Hülle und an der Scheibenoberfläche noch dem interstellaren Staub gleicht, also keine Veränderung erfahren hat. Dagegen sind die Staubteilchen in den dichten Regionen im Scheibeninneren bereits um mehrere Größenordnungen gewachsen – genau wie wir dies in der ersten Phase der Planetenentstehung erwartet haben!

Computermodelle zur Verwirbelung des Staubes in einer turbulenten Scheibe.

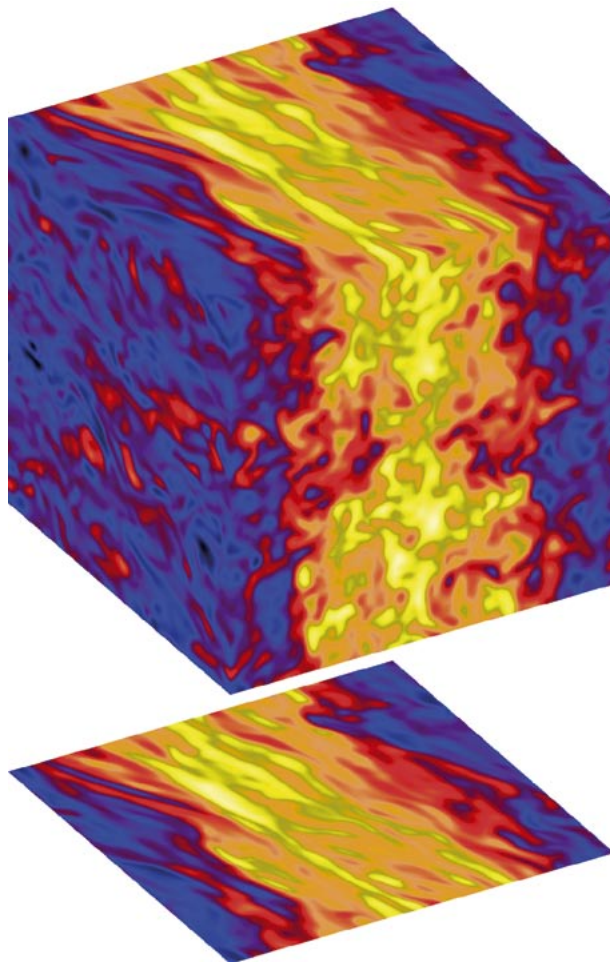
Das Erscheinungsbild der protoplanetaren Scheiben hängt, wie wir nun wissen, von der Verteilung des Staubes ab. Die Verteilung der Staubkörner wiederum wird durch zwei Effekte beeinflusst. Zunächst sind das: Wachstum und Transport.

Wachstum tritt auf, wenn zwei mikroskopische Staubkörner, durch die Brownsche Bewegung angetrieben, miteinander kollidieren. Die Körner haften dann sehr leicht aneinander und bilden ein etwas größeres Staubkorn. Dabei ändern sich die optischen Eigenschaften. Vereinfacht gesagt, wird der Staub mit zunehmender Größe immer schwerer nachweisbar. Einerseits spielt Streuung nur eine Rolle, solange die Größe der Staubkörner nahe bei der Größe der Lichtwellenlänge liegt, und zum anderen nimmt die Opazität, das ist die schattenwerfende Fläche eines Staubkorns im Vergleich zu seiner Masse, mit zunehmender Partikelgröße ab. Große Staubteilchen bieten bei gleicher Masse weniger Fläche, um Strahlung zu absorbieren. Wenn der Staub von den photographischen Aufnahmen verschwindet, so kann dies als Wachstum interpretiert werden.

Eine zweite Erklärung für das Verschwinden des Staubes ist jedoch das Sedimentieren zur Scheibenmittelebene (Transport). In der windstillen Studierstube sinkt der Hausstaub schnell herab und sammelt sich auf Tisch und Büchern. Ein Orkan kann jedoch bewirken, dass Sand über das Mittelmeer geblasen wird, dass Bäume entwurzelt und Dächer abgedeckt werden. Staub kann sich schon gar nicht mehr ablagern. Man sieht leicht, dass es einen großen Unterschied für die Verteilung des Staubes und auch größerer Brocken im protoplanetaren Nebel macht, je nachdem, ob es in der Scheibe ruhig (laminar) oder stürmisch (turbulent) hergeht. Die Turbulenz in einer Scheibe lässt sich leider noch nicht aus Beobachtungen ablesen. Es gibt nur einen sehr indirekten Hinweis auf das Auftreten von Turbulenz, nämlich den beobachteten Massenfluss aus der Scheibe auf den Stern. Dieser wird in einer laminaren Scheibe durch das fundamentale Prinzip der Drehimpulserhaltung verhindert. So wie uns der Mond jahrein und jahraus umkreist, kann auch das Scheibengas nicht einfach auf den Stern fallen. Nur wenn das Scheibengas hochgradig turbulent ist, dann kann der Drehimpuls durch die turbulente Viskosität nach außen transportiert werden, und das Gas fällt nach innen auf den Stern. Das Gas wird nun extrem

heiß, wenn es auf den Stern trifft, noch heißer als es die Sternoberfläche sowieso schon ist. Dieses überheiße Gas kann nun in machen jungen Sternen mit Scheiben durch einen Überschuss an ultravioletter Strahlung beobachtet werden, und für diese Objekte liegt es nahe, dass zumindest der innere Teil der Scheibe turbulent ist. Im äußeren Teil der Scheibe sind wir jedoch auf eine Modellierung mit dem Computer angewiesen. Auch hier konnte noch keine klare abschließende Antwort über die Wetterbedingungen in der protoplanetaren Scheibe gefunden werden. Derzeit denkt man an ähnliche Verhältnisse wie auf der Erde. Manchmal ist es windstill, und dann stürmt es wieder. Und wenn in Florida ein Hurrikan wütet, dann kann in Heidelberg zum gleichen Zeitpunkt sehr wohl die Sonne scheinen und ein lindes Lüftchen wehen.

Abb. III.2.3: Diffusion von Staub in der magnetisch getriebenen Turbulenz einer Protoplanetaren Scheibe (Gelb = hohe Staubdichte, blau = niedrige Staubdichte). Dargestellt wird ein kleiner würfelförmiger Ausschnitt aus der Akkretionsscheibe. Aus solchen aufwendigen dreidimensionalen Turbulenzsimulationen lässt sich die Verteilung von Staub in echten zirkumstellaren Scheiben ableiten.



Die Turbulenz hat nicht nur Einfluss darauf, ob Staub sedimentiert oder nicht, sie beeinflusst auch den Wachstumsprozess selbst. So, wie die größten Hagelkörner aus den stärksten Gewitterstürmen stammen, werden die Staubklumpen, welche im solaren Nebel zur Mittelebene sinken, größer sein, wenn die Scheibe turbulent ist. Brocken sinken nicht nur zur Mittelebene der Scheibe, sondern sie driften auch radial nach innen auf den Stern zu. Man stößt in einer laminaren Scheibe auf ein regelrechtes Ausregnen metergroßer Objekte in den Mutterstern. Der Grund dafür liegt darin, dass die Scheibe eine vertikale und radiale atmosphärische Schichtung im Druck besitzt. Diese Schichtung bestimmt die Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe, welche somit leicht langsamer als der Keplersche Wert ist. So spüren die auf Keplerbahnen laufenden Gesteinsbrocken einen Gegenwind, der sie nach innen spiralisieren lässt, bis sie auf den Stern hernieder regnen. Auch hier kann, ähnlich wie im Bild der Entstehung von Hagelkörnern, die Turbulenz für eine derartige Verzögerung im Niederschlag führen, dass die Brocken bereits zu größeren Körpern gewachsen sind, das heißt zu einer Größe, wo Gegenwind und Ausregnen keine Rolle mehr spielen. All diese Untersuchungen sind natürlich nur im Computer möglich. In Heidelberg untersuchen wir derzeit, wie Staub in magnetischen Stürmen verwirbelt wird (Abb. III.2.3). Unsere Simulationen lösen die magneto-hydrodynamischen Gleichungen auf einem Gitter und berechnen gleichzeitig die Bewegung der Staubteilchen in der Turbulenz. Als Ergebnis erhalten wir die Transporteigenschaften der Turbulenz für den Staub in Form von Diffusionskoeffizienten. Solche Rechnungen benötigen schon einige Wochen auf den schnellsten uns zur Verfügung stehenden Großrechenanlagen.

Das Wachstum von Metern zu Kilometern und zu Planetenkernen wird noch lange auf theoretische Modelle beschränkt sein, denn alle diese Objekte entziehen sich der Beobachtung. Erst das Ergebnis, nämlich ein junger Planet, lässt sich wieder beobachten und kann als Test für die Entwicklungsmodelle, die seine Entstehung beschreiben, herangezogen werden.

Bilder neugeborener Planeten. Auf der Suche nach Planeten in zirkumstellaren Scheiben

Ist es möglich, neugeborene oder auch ältere Planeten in zirkumstellaren Gas- und Staubscheiben aufzuspüren? Wie wir gesehen haben, werden zirkumstellare Scheiben als eine natürliche Begleiterscheinung der Sternentstehung angesehen – zumindest im Falle der Sterne geringer und mittlerer Masse, der sogenannten T-Tauri- und Herbig-Ae/Be-Sterne. Diese Scheiben stellen das Material und die Umgebung zur Verfügung, aus dem und in der sich Planeten bilden können.

Wenn man nun Strategien entwickeln möchte, um nach Planeten am Ursprungsort ihrer Entstehung zu suchen, muss man berücksichtigen, dass sowohl die zirkum-

stellaren Scheiben als auch die darin vermuteten Planeten einer ständigen Entwicklung unterliegen. Die Verfahren zur Suche nach Planeten in Scheiben müssen also dem Entwicklungszustand der Scheiben angepasst sein.

Um eines vorwegzunehmen: Es wird mit heutzutage oder in wenigen Jahren verfügbaren Beobachtungsinstrumenten kaum möglich sein, einen jungen Planeten in der Umlaufbahn um einen Stern direkt abzubilden, um den noch Scheibenrestmaterial vorhanden ist. Die Scheibe würde einen eingebetteten Planeten in allen Wellenlängenbereichen überstrahlen. Aber numerische Simulationen zeigen, dass Planeten über Wechselwirkungsprozesse charakteristische großskalige Störungen in der Scheibenstruktur hervorrufen, welche dann beobachtet werden können und auf die Anwesenheit eines verursachenden Planeten rückschließen lassen. Allerdings müssen diese Planeten genügend Masse besitzen, um eine merkliche Auswirkung auf die Scheibenstruktur zu haben. Der Nachweis von Planeten in Scheiben wird daher am ehesten über das Aufspüren von Gasriesen gelingen.

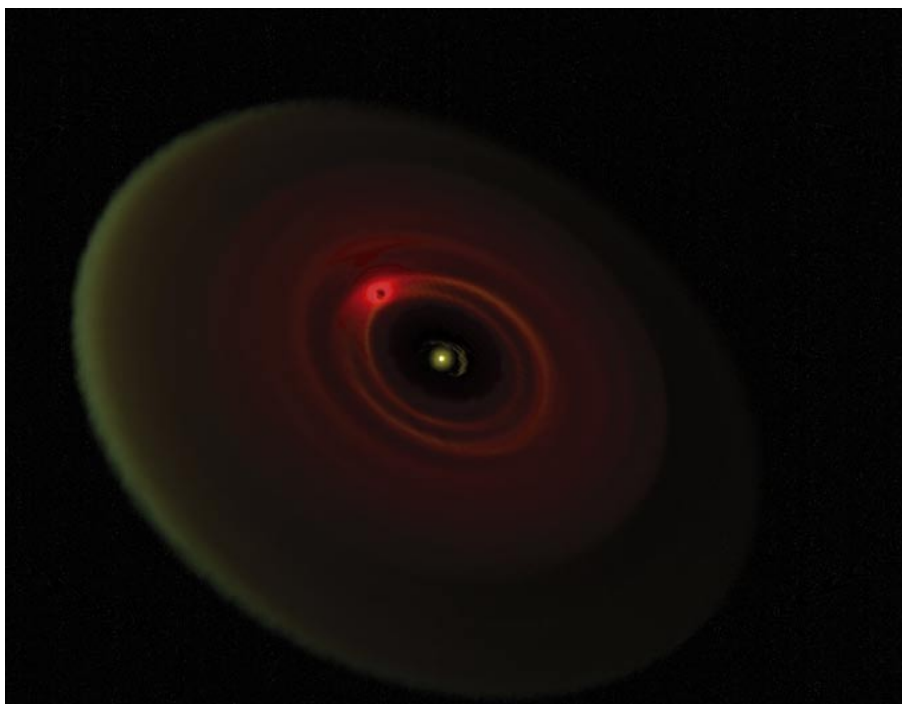
Lücken in Scheiben

Welches sind nun die charakteristischen Anzeichen von Planeten in zirkumstellaren Scheiben? Beginnen wir bei den jüngsten Planeten, die sich in Scheiben befinden, die noch optisch dick und bezüglich ihrer Struktur von der Dynamik des massenmäßig dominierenden Gases bestimmt sind. Dies sind Scheiben, wie sie um die oben erwähnten T-Tauri- und Herbig-Ae/Be-Sterne in einem Alter zwischen unter einer Million Jahre und wenigen Millionen Jahren gefunden wurden. Hydrodynamische

Simulationen von gasdominierten, viskosen protoplanetaren Scheiben zeigen, dass ein eingebetteter Planet entlang seiner Umlaufbahn in der Scheibe eine Lücke öffnen kann. Die Breite einer solchen Lücke ist abhängig von der Masse und der Umlaufbahn des Planeten, sowie von den hydrodynamischen Eigenschaften der Gasscheibe. Sie kann mehr als eine Astronomische Einheit betragen und ist damit um mehrere Größenordnungen größer als der sie verursachende Planet.

Mit Strahlungstransportsimulationen wurde untersucht, ob sich eine solche Lücke auch tatsächlich in hochaufgelösten Bildern wieder finden ließe. Immerhin ist zu vermuten, dass nicht nur das Gas, sondern auch der leichter nachweisbare Staub im Bereich der Lücke eine geringere räumliche Dichte als in dem umgebenden Scheibenmaterial aufweist. Es zeigte sich, dass Beobachtungen im Submillimeter- und Millimeter-Wellenlängenbereich die Abbildung einer solchen Lücke und damit den indirekten Nachweis junger Planeten ermöglichen werden. Die Massen der Planeten, die auf diese Weise indirekt nachgewiesen werden können, müssen mehr als etwa $1/10$ Jupitermasse betragen, um einen signifikanten »Fingerabdruck« in der Scheibe hinterlassen zu können.

Abb. III.2.4 Ein junger Planet mit der Masse und am Ort des heutigen Jupiter öffnet eine Lücke in der protoplanetaren Scheibe, aus der er entstanden ist. Diese dreidimensionale strahlungshydrodynamische Computersimulation zeigt hauptsächlich die thermische Emission des Staubes. Man erkennt sehr deutlich die Wärmeerzeugung durch den Einfall von Gas auf den Planeten. (Aus: H. Klahr und W. Kley, Universität Tübingen)



Für diese Beobachtungen wird das in wenigen Jahren in Betrieb gehende Atacama Large Millimeter Array (ALMA) in der chilenischen Atacama-Wüste zum Einsatz kommen. Konkret sagen die Simulationen voraus, dass Lücken problemlos in Scheiben um Sterne in den nächstgelegenen reicheren Sternentstehungsgebieten, z.B. im Sternbild Stier in einer Entfernung von ca. 140 pc, nachgewiesen werden können, so sie denn existieren und dieses Bild der Planetenentstehung und Planet-Scheibe-Wechselwirkung der Realität entspricht. Numerische Simulationen erlauben also klare Vorhersagen, die unser heutiges Bild der Entwicklung von jungen Planeten in Scheiben überprüfbar machen.

Der Vollständigkeit halber sei hier auch auf Spiralwellen hingewiesen, die von den Protoplaneten in der Scheibe angeregt werden (Abb. III.2.4). Allerdings ist

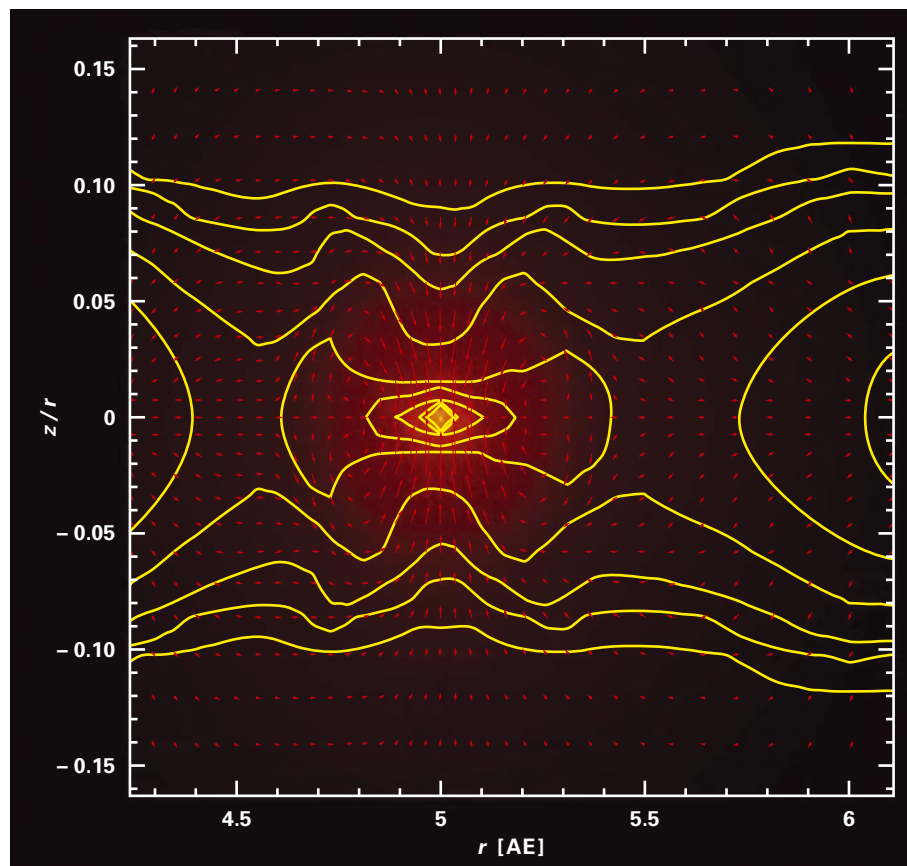
Abb. III.2.5: Wie schon in Abb. III.2.4, zeigen wir den jungen Planeten in der protoplanetaren Scheibe, und zwar einen Schnitt in radialer und vertikaler Richtung durch das Gas in der Nähe des Planeten. Konturlinien geben die Gasdichte an und lassen die scheibenähnliche Struktur um den Planeten erkennen. Die Pfeile zeigen die Gasströmung auf den Planeten. Die aus der Akkretion resultierende Temperatur wird durch die Farben dargestellt. Man erkennt dass der Planet von einer riesigen Hülle warmen Staubes umgeben ist, die wahrscheinlich sein erstes Lebenszeichen für die Beobachter darstellen wird. (Aus: H. Klahr und W. Kley, Univ. Tübingen).

der durch diese Wellen hervorgerufene Dichtekontrast zu gering, um tatsächlich nachweisbar zu sein. Darüber hinaus vermutet man, dass diese Wellen durch Turbulenz in der Scheibe sehr effektiv gedämpft werden und daher kaum in Erscheinung treten können.

Auch Planeten akkretieren Materie – und verraten sich durch ihre warme Umgebung

Aber mit ALMA werden wir noch einen Schritt weiter gehen können. Junge, in Gasscheiben eingebettete Planeten können auch weiterhin Gas aufsammeln (»akkretieren«), selbst nachdem sie eine Lücke geöffnet haben. Erst wenn ein Planet eine Masse von etwa zehn Jupitermassen erreicht hat, werden Gezeitenkräfte so groß, dass sie einen weiteren Gasstrom in die Lücke und damit auf den (Proto-)Planeten unterbinden.

Wie bei der Akkretion auf den Zentralstern, wird auch die Akkretion von Gas und Staub auf den Planeten über eine Akkretionsscheibe stattfinden. In der unmittelbaren Umgebung des Planeten wurde in numerischen Simulationen eine solche planetare Akkretionsscheibe tatsächlich gefunden. Bei der Akkretion von Materie auf den Planeten wird die Gravitationsenergie des einfallenden Materials freigesetzt und trägt zur Aufheizung des Staubes im Bereich des Planeten bei (Abb. III.2.5). Außerdem sind die jungen Planeten selbst noch sehr heiß: Sie gewinnen Energie aus der eigenen Kontraktion und



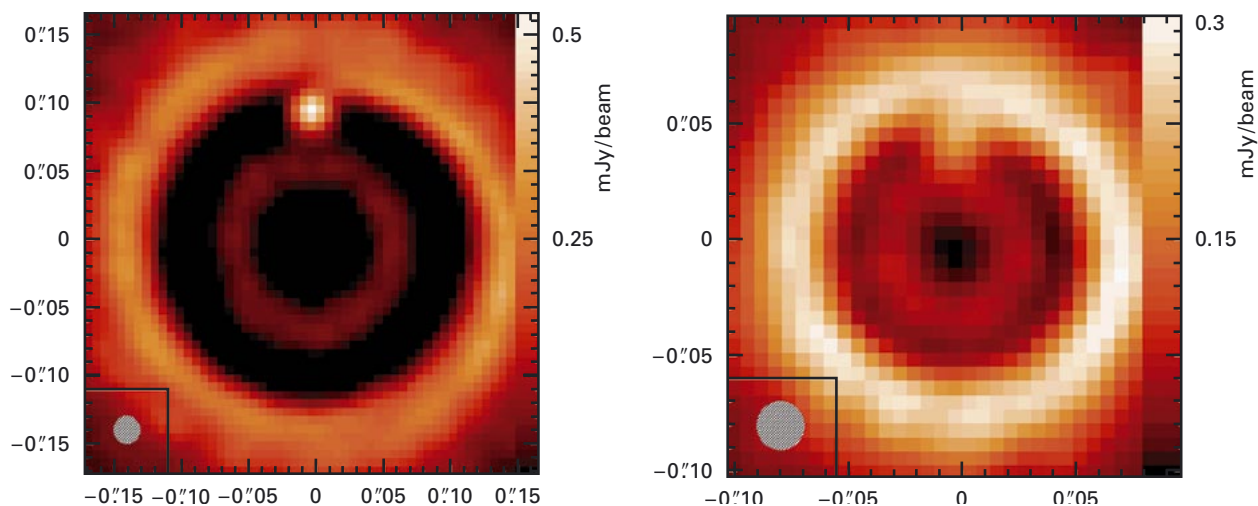


Abb. III.2.6: Junge Planeten in gasdominierten Scheiben wird man über die Lücke entlang der Umlaufbahn des Planeten nachweisen können. Außerdem wird vermutet, dass sich junge Planeten durch den warmen Staub in ihrer Umgebung verraten. Diese Bilder zeigen, wie die Lücke und die warme Region um einen jungen Planet mit einer Jupitermasse im Abstand von 5 AE vom Zentralstern aussehen würde, wenn wir ein solches System in wenigen Jahren mit ALMA beobachten würden. Die angenommene Entfernung beträgt 50 pc (*links*) bzw. 100 pc (*rechts*). (Wolf und D’Angelo 2005, ApJ)

können Oberflächentemperaturen von mehreren hundert Kelvin, ja sogar bis über 1000 Kelvin aufweisen. Man würde also in jedem Fall erwarten, dass die Materie in der Region um den Planeten deutlich wärmer als das umgebende Scheibenmaterial ist. Der Planet und seine Umgebung sollten daher als heißer Punkt in der Scheibe auffallen.

An dieser Stelle sind es wiederum numerische Simulationen, mit welchen die tatsächliche Größenordnung dieses Effektes sich quantifizieren lässt. Denn nur so wird sich zum Schluss eine Aussage darüber treffen lassen, ob wir nach den so genannten »Hot Spots« in der Scheibe als den bisher auffälligsten Hinweisen auf Planeten suchen sollten.

Die Ergebnisse der Simulationen sind ermutigend: Tatsächlich hebt sich der warme, dichte Staub im Einflussbereich des Planeten in den Submillimeter- und Millimeter-Bildern deutlich von der staubarmen Lücke ab (Abb. III.2.6). Und wieder werden sie sich mit ALMA beobachten lassen. Einziger Wermutstropfen: Die Zahl der Objekte, bei denen sinnvollerweise nach diesen »Hot Spots« gesucht werden kann, ist etwas stärker eingeschränkt, da diese Strukturen kleiner als die Lücken selbst sind. Junge Sterne in Entfernungen von bis zu 100 pc werden auf der Beobachtungsliste stehen. Außerdem müssen die ausreichend massereichen Planeten den Stern in einem Abstand von einigen Astronomischen Einheiten umkreisen: Ein junger Jupiter (Sonnenabstand: 5.2 AE) könnte auf diese Weise gefunden werden.

Planeten in alten, entwickelten Staubscheiben

Abschließend wollen wir einen Blick auf Debris-Scheiben werfen. Dies sind zirkumstellare Scheiben am Ende ihrer Entwicklung, in denen die Entstehung von Planetensystemen – wenn überhaupt vorhanden – bereits abgeschlossen ist. Debris- oder Trümmerscheiben heißen sie deshalb, weil neben den Planeten nur noch die Restprodukte der Planetenentstehung – Kometen, Planetesimale und Staub – vorhanden sind. Diese Scheiben sind optisch dünn. Ihre Struktur ist daher neben der Gravitation durch die Wechselwirkung der stellaren Strahlung mit dem Staub bestimmt. Unser Sonnensystem kann als ein Vertreter dieser Objektklasse angesehen werden.

Auch für die Beobachtung und damit für die Untersuchung von Debris-Scheiben spielen mikrometergroße Staubpartikel eine wesentliche Rolle. Allerdings handelt es sich in diesen Scheiben nicht mehr um den Staub, welcher ursprünglich aus der Muttermolekülwolke stammend als Keim für die Entstehung von Planeten diskutiert wird. Vielmehr handelt es sich um eine zweite Generation von Staub, welcher durch die Kollision von Planetesimalen ständig nachproduziert wird. Ebenso wie der ursprüngliche Staub werden die neu produzierten Staubkörner über den oben beschriebenen Einfluss des Sterns ständig aus dem System entfernt: Entweder werden die Staubkörner durch den Einfluss des so genannten Poynting-Robertson-Effekts auf Spiralbahnen gezwungen, die auf dem Stern enden – oder sie werden durch den stellaren Strahlungsdruck aus der Scheibe »geblasen«. Welcher Effekt dominiert, ist im Wesentlichen durch die Größe und die chemische Zusammensetzung der Staubteilchen vorgegeben.

Auch in Debris-Scheiben können massereiche Planeten nicht unbemerkt ihre Bahnen ziehen. Im Gegensatz zu den gasdynamischen Effekten, mit denen die Wechselwirkung von Planeten mit jungen, gasdominierten Scheiben beschrieben werden konnte, ist es hier vielmehr der Einfluss der Gravitation der Planeten, welcher den Staub in der Scheibe in auffällig strukturierte

Verteilungen zwingt. Charakteristisch hierbei ist die Ansammlung von einwärts driftenden Staubpartikeln an Resonanzstellen entlang der Umlaufbahn des Planeten. Auch hat die gravitative Streuung des Staubes an den Planeten zur Folge, dass in äußeren Planetesimalgürteln erzeugter Staub nicht oder nur in beschränktem Maße Bereiche innerhalb der Umlaufbahn eines Planeten erreichen kann. Wie staubarm das von der Planetenbahn eingeschlossene innere Gebiet eines Planetensystems wird, ist konsequenterweise wesentlich von der Masse des Planeten abhängig (Abb. III.2.7).

Können die Auswirkungen von Planeten in Debris-Scheiben beobachtet werden? Ja, denn die beschriebenen Effekte verändern die Staubverteilung in Debris-Scheiben in so großen Bereichen, dass sie bereits mit heutigen Beobachtungsinstrumenten räumlich aufgelöst und damit nachgewiesen werden können. Wiederum sind es im fernen Infrarot- bis Millimeterwellenlängenbereich gewonnene Bilder, welche die charakteristischen Resonanzstrukturen oder staubarmen inneren Bereiche in Debris-Scheiben am besten sichtbar machen. Dies liegt an der geringen Temperatur des Staubes in den Außenbereichen der Scheibe, dessen thermische Reemission wird bei diesen Wellenlängen beobachtet.

In Ergänzung hierzu ist es auch möglich, aus Spektren von Debris-Scheiben, die im nahen bis mittleren Infrarot gewonnen werden, auf staubarme Bereiche um den Stern zu schließen: Je näher am Stern sich Staub befindet, desto wärmer ist er. Fehlt ausgerechnet dieser sternnahe Staub, so spiegelt sich dies in einem verringerten Fluss in eben diesem Wellenlängenbereich wider.

Numerische Simulationen von Debris-Scheiben können helfen, Bilder von Debris-Scheiben genauer zu analysieren. Statt der einfachen Aussage, dass der Einfluss eines Planeten für die beobachtete Struktur einer Debris-Scheibe verantwortlich sein muss, lässt der Vergleich mit Simulationen Rückschlüsse auf Masse und genaue Umlaufbahn des Planeten, sowie auf den beobachteten Staub – den Entstehungsort und seine typische Größe – zu.

Zusammenfassung und Ausblick

Numerische Simulationen zeigen, dass Teleskope und Beobachtungsinstrumente, wie sie uns in wenigen Jahren zur Verfügung stehen werden, den Nachweis von Planeten in zirkumstellaren Scheiben erlauben werden. Allerdings wird es die Streuung des Sternlichts und die Wärmestrahlung der kleinsten Staubpartikel schwierig machen, Planeten direkt abzubilden. Aber Planeten prägen den zirkumstellaren Scheiben großskalige, charakteristische Signaturen auf, welche mit Observatorien wie dem Atacama Large Millimeter Array (ALMA), dem Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy (SOFIA) und dem James Webb Space Telescope (JWST) in wenigen Jahren beobachtbar sein werden. Primäre Signaturen sind Lücken in jungen Scheiben und asymmetrische Dichtemuster in Debris-Scheiben.

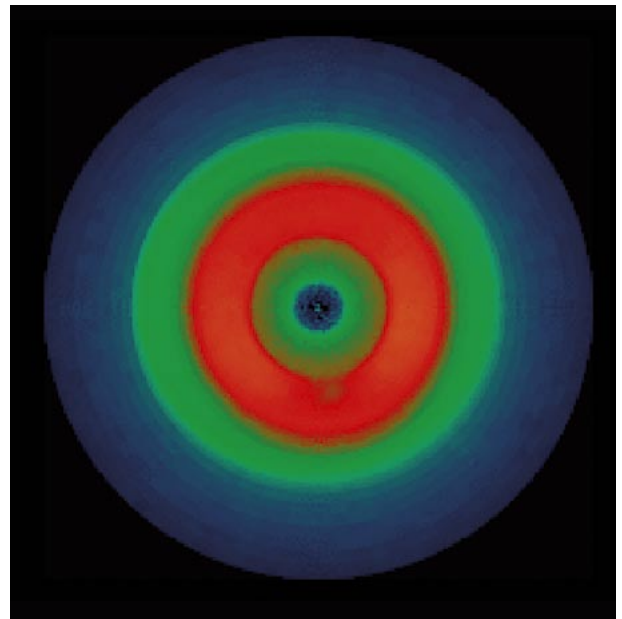


Abb. III.2.7: Simulierte Debris-Scheibe des jungen Sonnensystems bei einer Wellenlänge von 1.3 mm. Die Position des Neptun ist markiert. Man sieht die hufeisenförmige Verteilung von Staubpartikeln entlang der Umlaufbahn von Neptun. Außerdem ist zu erkennen, dass Neptun den Innenbereich seiner Bahn sehr effektiv von den im außerhalb seiner Bahn gelegenen Kuipergürtel durch Planetesimal-Kollisionen erzeugten Staubkörnern frei hält. (S. Wolf und A. Morio-Martin)

All diese zukünftigen Beobachtungen werden uns helfen, ein klareres Bild von der Planetenentstehung zu entwerfen, indem es uns gelingen wird, die vielen freien Parameter in unseren numerischen Modellen einzuschränken. Somit hoffen wir der großen Frage nach dem Ursprung unseres Heimatplaneten und nach der Häufigkeit erdähnlicher Planeten bei fernen Sonnen ein wenig näher zu kommen.

*(Theoriegruppe der Abt. Planeten- und
Sternentstehung am MPIA:*

Hubert Klahr (PI), Anders Johansen,

Markus Feldt, Thomas Henning,

Natalia Dzyurkevich; Willhelm Kley/Tübingen,

Peter Bodenheimer / Lick Observatory, Santa Cruz;

Emmy-Noether-Forschungsgruppe »Evolution of circumstellar dust disks to planetary systems« am MPIA:

Sebastian Wolf (PI), Jens Rodmann, Kacper Kornet,

Alexander Schegerer; Gennaro D'Angelo/Exeter,

Amaya Moro-Martin/Princeton, Karl R. Stapelfeldt/

JPL, Deborah L. Padgett/CIT)

III.3 Näher und näher an die Zentren von Galaxien

Alle massereichen Galaxien besitzen ein ausgeprägtes Zentrum, wo sowohl die Sterndichte als auch die Häufigkeit des molekularen Gases um mindestens das Zehnfache höher ist als im Durchschnitt. Einige wenige Prozent der Galaxien beherbergen jedoch in ihren Zentren einen besonderen Motor, der sehr viel stärker ist, als eine Konzentration von Sternen und Gas erklären könnte – wir nennen diese Zentren »aktive Galaxienkerne« (active galactic nuclei, AGN). Das MPIA nutzt seinen privilegierten Zugang zu weltweit einzigartigen Instrumenten am Very Large Telescope (VLT) auf dem Cerro Paranal in Chile und führt dort ein Projekt durch, mit dem das Geheimnis entschlüsselt werden soll, wie der zentrale Motor dieser AGN funktioniert. Zu diesem Zwecke verwenden wir eine Kombination aus hoher und höchster Winkelauflösung, die unsere Beobachtungen immer dichter an die unmittelbare Quelle der Aktivität heranführt.

Die überwiegende Strahlung im heutigen Universum stammt von Sternen, die ihre Energie durch Kernfusion erzeugen. Wir wissen jedoch, dass die extrem energiereichen Prozesse, die in aktiven Galaxienkernen ablaufen, nicht durch normale Sterne erzeugt werden können, sondern mit einem exotischeren Prozess in Zusammenhang stehen müssen, der in der Lage ist, über Zeitspannen von 10^7 Jahren hinweg kontinuierlich $10^{35} - 10^{39}$ Watt freizusetzen. Der extremste Fall einer solchen galaktischen Kernaktivität tritt in Quasaren auf, wo der Kern selbst so leuchtkräftig ist, dass er die gesamte Galaxie mit ihren Milliarden Sternen um Größenordnungen überstrahlt. Vor mehr als 30 Jahren (1969) schlug der britische Astronom Donald Lynden-Bell vor, dass aktive Galaxien ihre Energie durch Akkretion von Materie auf supermassereiche Schwarze Löcher in ihren Zentren beziehen. Wenn die Zufuhr von Materie zu einem späteren Zeitpunkt aufhört, kommt die Aktivität zum Erliegen, das massereiche Schwarze Loch bleibt jedoch im Zentrum der Galaxie erhalten. Entsprechend sollten diese massereichen, dunklen, kompakten Objekte als Überreste einer früheren Quasar-Phase noch immer in den Kernen vieler ruhiger Galaxien, vielleicht sogar in allen Galaxien, schlummern. Und dies scheint in der Tat meist der Fall zu sein: Die in den letzten Jahren angesammelten Beobachtungshinweise deuten mit großer Sicherheit auf die Existenz eines supermassereichen Schwarzen Lochs in unserer eigenen, jetzt ziemlich friedlichen Milchstraße hin, und das Gleiche gilt für viele andere nahe Galaxien. Nach heutigen Messungen haben diese zentralen Schwarzen Löcher die 10^6 - bis 10^7 -fache Masse unserer Sonne, konzentriert in einem Gebiet, das nicht größer ist als un-

ser Sonnensystem. Die Anziehungskraft, die eine derart hohe Massenkonzentration ausübt, wird von den Sternen und dem Gas in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft gespürt werden. Selbst wenn wir also das Schwarze Loch nicht direkt sehen können, können wir durch die Untersuchung der Sterne und des Gases in seiner Umgebung auf seine Gegenwart schließen. Deshalb bemühen sich die Astronomen, die Zentren von Galaxien mit der höchstmöglichen räumlichen Auflösung zu erkunden.

Eine Schwierigkeit bei der Untersuchung von Galaxienzentren ist die Tatsache, dass viele von ihnen anscheinend tief in Staub eingebettet sind. Dieser absorbiert einen beträchtlichen Teil des Lichts aus diesen Gebieten, sodass wir keine freie Sicht auf den zentralen Motor haben. Deshalb sind für die Untersuchung von Galaxienzentren neben sehr hohen räumlichen Auflösungen auch Beobachtungen in Bereichen des elektromagnetischen Spektrums nötig, wo die Auswirkungen der Staubabsorption gering sind. Solche Beobachtungen sind bei anderen Wellenlängen als denen des uns vertrauten sichtbaren Bereichs tatsächlich möglich, und zwar bei den kürzesten Röntgenwellenlängen oder bei langen Wellenlängen in den Infrarot- und Radiobereichen. Im nahen Infrarot, bei etwa $2\text{ }\mu\text{m}$, ist die Auswirkung der Staubabsorption bereits fünfmal geringer als im optischen Bereich; im mittleren Infrarot, bei Wellenlängen größer als $10\text{ }\mu\text{m}$, ist sie fast vernachlässigbar. Hinzu kommt, dass der Staub durch die Absorption ultravioletter und optischer Strahlung auf Temperaturen von einigen hundert Kelvin aufgeheizt wird. Und die Strahlung dieses warmen Staubs ist dann bei mittleren Infrarotwellenlängen direkt beobachtbar.

Das MPIA in Heidelberg hat die Möglichkeiten erkannt, die Infrarotbeobachtungen im Hinblick auf staubverhüllte Quellen bieten – das sind neben Galaxienkernen auch Sterne in der Frühphase ihrer Entstehung – und für diesen Spektralbereich hochmoderne, auf adaptiver Optik und Interferometrie basierende Instrumente entwickelt. Diese Instrumente erlauben es uns, die Galaxienkerne auf räumlichen Skalen zu beobachten, wie sie nie zuvor zugänglich waren: bis hinab zu einigen zehn Millibogensekunden ($1\text{ Millibogensekunde} = \frac{1}{1000}\text{ Bogensekunde} = 2.8 \times 10^{-6}\text{ Grad}$). Bislang wurden Skalen deutlich unter einer Bogensekunde im optischen Bereich nur mit dem HUBBLE-Weltraumteleskop und im Radiobereich mit Hilfe von Interferometrie mit großer Basislänge erreicht. Eines der neuen Infrarotinstrumente ist NAOS-CONICA (NACO), eine Kombination aus Kamera und Spektrograph für das nahe Infrarot ($1 - 2.5\text{ }\mu\text{m}$), die es ermöglicht, das »Verwackeln« astronomischer Bild-

aufnahmen durch die Atmosphäre zu korrigieren. NACO arbeitet am Very Large Telescope (VLT) der ESO am Paranal-Observatorium (siehe Jahresbericht 2002). Das zweite Instrument ist MIDI, ein Interferometer für den mittleren Infrarotbereich ($8 - 13 \mu\text{m}$), das es ermöglicht, die einzelnen 8-m-Teleskope des VLT zu einem riesigen Teleskop zusammenzukoppeln (siehe Jahresbericht 2003).

Unsere Arbeitsgruppe am MPIA verwendet diese Instrumente, um Bilder und Spektren der Kerne der uns am nächsten gelegenen Galaxien am Südhimmel aufzunehmen. Für die meisten unserer Beobachtungsobjekte bedeutet die erreichte Auflösung, dass wir uns dem unmittelbaren Galaxienzentrum auf 1 bis 10 Parsec nähern (1 Parsec entspricht $3 \times 10^{15} \text{ m}$). Bei den allernächsten Objekten können wir damit die Einflusssphäre des Schwarzen Lochs auflösen; bei den meisten Objekten erreichen wir diese knapp. Nichtsdestoweniger führen uns diese Abstände 10- bis 30-mal dichter an das Zentrum heran als es zuvor im mittlerem Infrarotbereich möglich war.

Ziel unseres Projekts ist, direkte Beobachtungshinweise für (oder gegen) die heute gängige Vorstellung zu sammeln, wie das zentrale Kraftwerk in aktiven Galaxiekernen funktioniert. Demnach sitzt in seinem direkten Zentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch mit einer Masse zwischen 10^6 (bei der Milchstraße) und einigen 10^9 Sonnenmassen (bei hellen Quasaren).

Materie, die auf das Zentrum zuströmt, wird wegen ihres Drehimpulses nicht direkt vom Schwarzen Loch verschluckt. Stattdessen sammelt sie sich in einer Akkretionsscheibe rings um das Schwarze Loch an, deren Durchmesser bei einem typischen Schwarzen Loch von 10^8 Sonnenmassen bis zu einem Zehntel Parsec betragen kann.

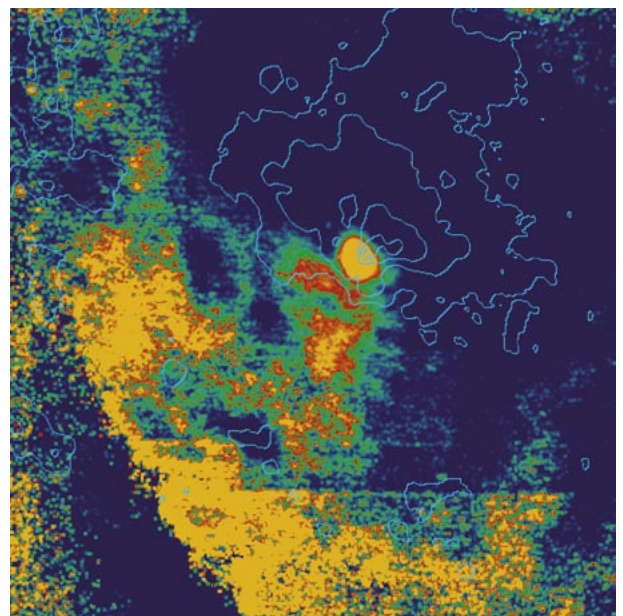
In der Akkretionsscheibe verliert die Materie durch Reibung Drehimpuls, spiralt nach innen, heizt sich aufgrund der Reibung bis auf etwa 100000 Kelvin auf und wird dann schließlich vom Schwarzen Loch verschluckt. Der Großteil der erzeugten Energie wird in einem sehr weiten Spektralbereich von kurzwelligen Röntgenstrahlen bis hin zu Infrarotwellenlängen abgestrahlt. Genauere Berechnungen zeigen jedoch, dass Reibung allein nicht ausreicht, um Drehimpuls abzuführen, sondern dass auch polare Abströmungen von der Scheibe dazu nötig sind.

Modelle sagen vorher, dass weiter außen Gas und Staub um einen aktiven Kern in einer dicken, ringförmigen Struktur verteilt sein sollten, in deren Zentrum der aktive Kern liegt. Die Absorption durch diesen Staubtorus kann zwar je nach seiner Ausrichtung den Kern vor unseren Blicken verbergen, wird aber dennoch Strahlung vom aktiven Zentrum in die polaren Richtungen entweichen lassen. In den einfachsten Modellen fallen die Achsen der Akkretionsscheibe und des umgebenden Torus zusammen. Die Strahlung entweicht im Allgemeinen in einem Kegel, dessen Öffnungswinkel durch die inneren



Abb. III.3.1: Die zentralen 100 Parsec der Circinus-Galaxie (Kompositaufnahme: rot – NACO $2 \mu\text{m}$, grün – NACO $1.3 \mu\text{m}$, blau – HST $0.8 \mu\text{m}$). Die rote Quelle kann als direktes oder gestreutes Licht interpretiert werden, das von den Wänden eines Staubtorus stammt. Ein ziemlich eng gebündelter Lichtstrahl – helles längliches Gebiet beim Positionswinkel von $\sim -45^\circ$ – weist von der roten Quelle weg. Die Natur dieses Strahls aus Kontinuumslicht ist uns nicht klar; höchstwahrscheinlich ist es Streulicht von einem gebündelten Lichtstrahl, ähnlich dem Phänomen eines Leuchtturms in einer nebligen Nacht.

Abb. III.3.2: Die mit NACO gewonnene J-K-Farbkarte von Circinus zeigt eine leicht längliche Zentralquelle. Die Richtung deren Längsachse ist senkrecht zum $\text{H}\alpha$ -Ionisationskegel von Circinus, dessen Umrisse hier dargestellt sind.



Wände des Torus begrenzt wird. Häufig werden auch polare Abströmungen von Gas oder sogar eng gebündelte Jets beobachtet. Man nimmt an, dass der Torus zwischen einigen wenigen und etlichen zig Parsec groß ist und einen deutlichen Temperaturgradienten aufweist (heißer als 1000 Kelvin an der Innenwand und nach außen abfallend auf einige Dutzend Kelvin). Aufgrund seiner Temperatur strahlt der Torus hauptsächlich im mittleren Infrarotbereich. Der Temperaturabfall nach außen sollte dazu führen, dass die scheinbare Größe des Torus mit der Wellenlänge anwächst.

Der staubverhüllte aktive Kern der Circinus-Galaxie.

Die ersten Ergebnisse von MIDI, in denen zum ersten Mal die Emission im mittleren Infrarot des Staubtorus von NGC 1068, dem Prototyp einer Seyfert-II-Galaxie, aufgelöst wurde, sind bereits im vorjährigen Jahresbericht vorgestellt worden. Daher möchten wir uns jetzt auf die Ergebnisse des NACO-Instruments konzentrieren, das im nahen Infrarot arbeitet. Obwohl seine räumliche Auflösung der des MIDI-Interferometers unterlegen ist, hat es den Vorteil, Direktaufnahmen und Spektren im nahen Infrarot zu liefern, die eine dreimal bessere räumliche Auflösung haben als das HST.

Abb. III.3.1 zeigt eine NACO-Kompositaufnahme der Zentralregion einer der nächstgelegenen aktiven Galaxien am Südhimmel, der Circinus-Galaxie. Trotz ihrer geringen Entfernung ist die Kernregion dieser Galaxie wegen der großen Staubmengen um sie herum bei optischen

Wellenlängen nicht sichtbar. Nichtsdestoweniger sind wir mit NACO in der Lage, nahe an ihr Zentrum zu gelangen: Bei Wellenlängen größer als $2\ \mu\text{m}$ erscheint dort eine unbekannte helle Quelle (rote, helle Quelle in Abb. III.3.1), von der mit dem HST bei Wellenlängen um $1.7\ \mu\text{m}$ und kürzer nichts zu sehen war.

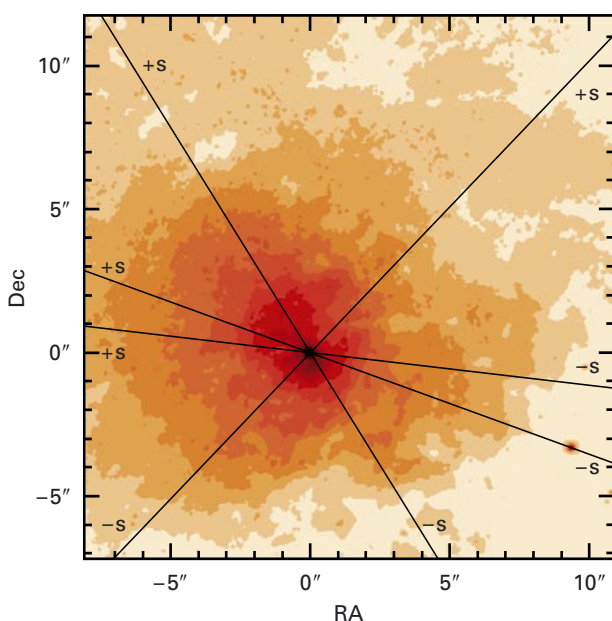
Unsere NACO-Aufnahmen bei Wellenlängen größer als $3\ \mu\text{m}$ und ergänzende Interferometerbeobachtungen mit MIDI zeigen, dass die rote, punktförmige Quelle in der Circinus-Galaxie einen Radius von weniger als 1 pc und eine längliche Morphologie hat (siehe Abb. III.3.2). Die Orientierung der länglichen Struktur ist beinahe senkrecht zu der Richtung, in der wir den Strahlungskegel aus dem Circinus-Kern herauskommen sehen. Wie die Abb. III.3.1 und III.3.2 zeigen, kommt ein Strahl gebündeltes Licht aus dem Circinus-Kern hervor, der bis in eine Entfernung von etwa 10 pc vom Zentrum reicht. Ein breiter Strahl ist durch das ionisierte Gas verfolgbar (Abb. III.3.2), während ein überraschend eng gebündelter Strahl in Kontinuumslicht bei Wellenlängen unter $2\ \mu\text{m}$ beobachtet wird (Abb. III.3.1). Im letzteren sehen wir vermutlich Licht vom Kern, das von Staub oberhalb des Torus gestreut wird.

Das Schwarze Loch in Centaurus A wird »gewogen«

Wie oben erklärt, verhindert der Drehimpuls, dass das Material um den Kern direkt in das zentrale Schwarze Loch stürzt. Der Abtransport von Drehimpuls geschieht nur langsam, sodass das Gas bei jedem Radius nahezu auf einer Keplerbahn rotiert. Dies gilt nicht nur für die innere Akkretionsscheibe, sondern auch für Gasscheiben bei größeren Radien.

Bei Centaurus A, dem nächstgelegenen AGN, haben wir die Rotationsgeschwindigkeiten um den Kern mit NACO gemessen, indem wir eine verbotene Linie von Fe^+ bei einer Wellenlänge von $1644\ \mu\text{m}$ beobachteten. Wir verwendeten eine Spaltbreite von 86 Millibogensekunden und erreichten eine räumliche Auflösung (längs des Spalts) von ~ 60 Millibogensekunden. Um die Rotationsgeschwindigkeiten und die Geschwindigkeitsdispersion längs der vier beobachteten Positionswinkel des Spalts zu beschreiben (Abb. III.3.3 und III.3.4), konstruierten wir ein dynamisches Modell, in dem wir annehmen, dass das Gas in einer dünnen Scheibe liegt. Wird die interne Geschwindigkeitsdispersion des Gases in Form eines Druckterms mit berücksichtigt (»heiße Scheibe«), erhalten wir eine zentrale Masse von $8.6 \times 10^7 M_{\text{Sonne}}$. Spiegelt die beobachtete Geschwindigkeitsdispersion nur Bahnbewegungen wider (»kalte Scheibe«), könnte die Masse des Schwarzen Lochs um einen Faktor 2 kleiner sein. Dieser Wert ist 2.5 mal geringer als der zuvor von Marconi et al. (2000) abgeleitete. Der Unterschied bei der Abschätzung der zentralen Masse beruht nicht auf Differenzen im angenommenen Neigungswinkel, sondern spiegelt hauptsächlich die Tatsache wider, dass

Abb. III.3.3: H-Band Aufnahmen der Zentralregion von Centaurus A. Die Spaltorientierungen für die spektroskopischen Untersuchungen mit NACO sind durch gerade Linien angegeben.



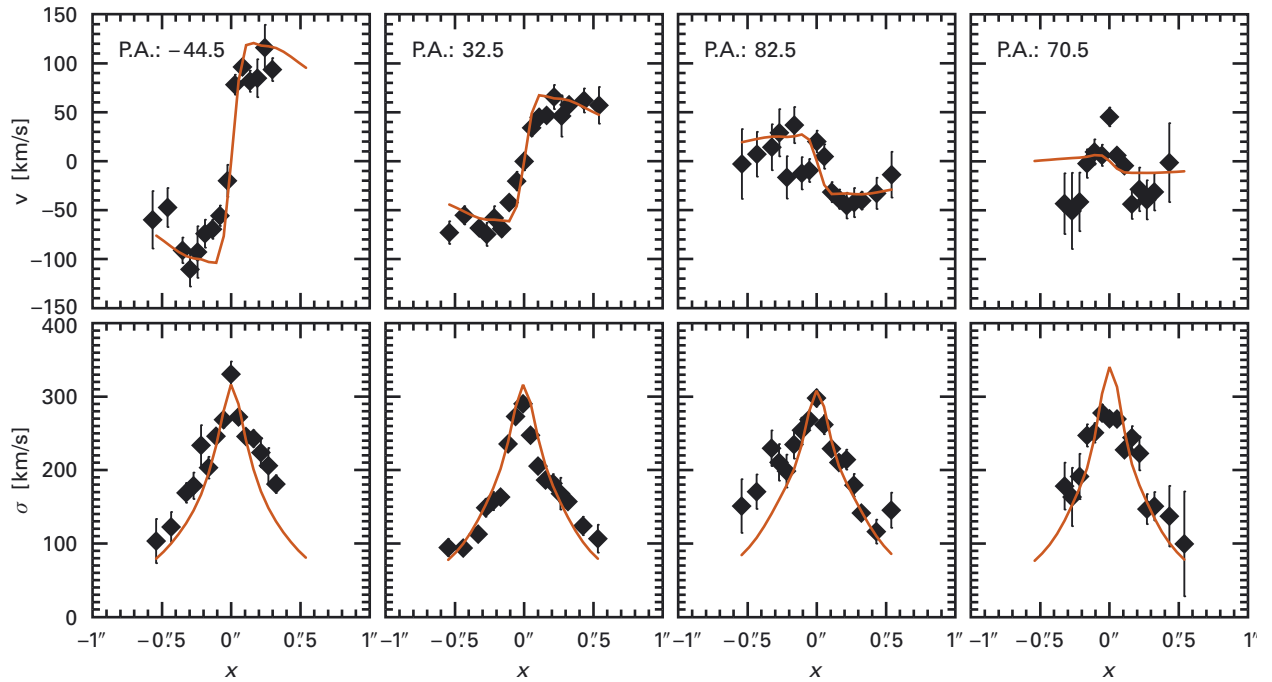
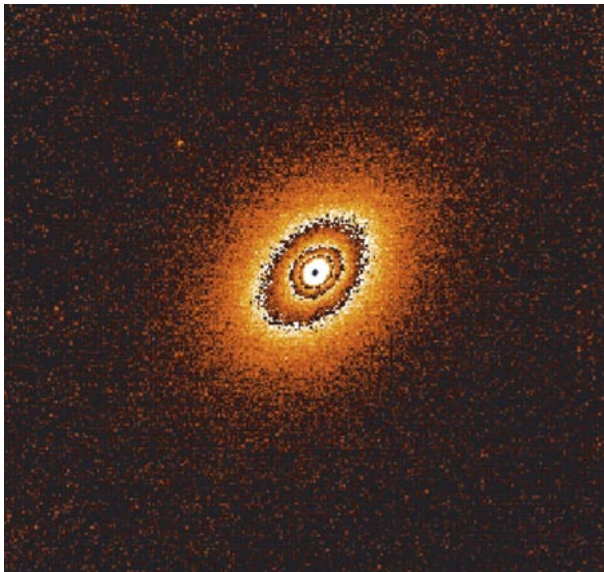


Abb. III.3.4: Die NACO-Rotationskurven (obere Bildreihe) und Geschwindigkeitsdispersionsprofile (untere Bildreihe), gewonnen aus einer Fe^+ -Emissionslinie längs der vier in Abb. III.3.3 gezeigten Spaltpositionen. Man beachte, dass die Bildreihen nur das direkte Zentrum von Centaurus A innerhalb eines Radius von 0.5 Bogensekunden (19 Parsec) zeigen. Das am besten passende Scheibenmodell (rote Linien) nimmt einen

Neigungswinkel von 45° an und führt zu einer Masse für das Schwarze Loch von $(8.6 \pm 0.3) \times 10^7 M_{\text{Sonne}}$. Hierbei nehmen wir an, dass das Gas eine innere Geschwindigkeitsdispersion hat, die wie ein Druckterm wirkt. Wird die Geschwindigkeitsdispersion in dem Modell vernachlässigt (kalte Scheibe), ergibt sich eine Masse für das Schwarze Loch, die um den Faktor 2 geringer ist.

Abb. III.3.5: Kontinuumstrahlung der nahen Seyfert-II-Galaxie ESO 428, aufgenommen von NACO bei $2.42 \mu\text{m}$. Eine sich wiederholende Farbtabelle unterstreicht die elliptische Lichtverteilung. Das Lichtprofil ist durch eine helle Spitze im Zentrum gekennzeichnet, die die Position des Kerns markiert. Diese helle Spitze stammt aus einem Gebiet mit nur 13 pc Durchmesser.



wir zum ersten Mal die Einflussosphäre des Schwarzen Lochs im Zentrum von Centaurus A aufgelöst haben. Die aus unserer Untersuchung abgeleitete geringe Masse für das Schwarze Loch stimmt sehr viel besser mit der mittleren Korrelation zwischen den Massen Schwarzer Löcher und den Massen der aus Sternen bestehenden galaktischen Zentralbereiche (engl. Bulges) in anderen Galaxien überein.

Wie weit nach außen reicht der Einfluss des AGN?

Wie oben bereits erwähnt, zeigen aktive Galaxienkerne häufig Abströmungsphänomene und gebündelte Winde. Eine Methode, die Dynamik und Energetik dieser Winde zu verfolgen, ist die Untersuchung von Gas aus hochionisierten Atomen. Die beobachteten, extrem hohen Ionisierungsstufen erfordern Photonenenergien von mehr als 100 eV. Photonen dieser Energie werden im Allgemeinen nicht so leicht von Sternen erzeugt, sind aber zweifellos während der aktivsten Phasen galaktischer Kerne vorhanden. Der Abdruck, den dieses hochionisierte Gas in den optischen und Infrarotspektren aktiver Galaxien hinterlässt, besteht aus Emissionslinien von Ionen wie Fe^{+6} bis Fe^{+13} , Si^{+5} bis Si^{+9} , Mg^{+7} , Ca^{+6} , Ne^{+5} usw. Bei der Röntgenstrahlung sind Ionisierungsstufen

bis hinauf zu Fe^{+23} nachgewiesen worden. Wegen ihrer hohen Ionisationsstufen können diese Linien nur in Gaswolken auftreten, die sehr nahe – innerhalb weniger Dutzend Parsec – an der Zentralquelle liegen. Sie sind daher echte Indikatoren für die dynamischen Vorgänge und Strahlungsprozesse, die im Gas relativ dicht am zentralen Motor ablaufen.

Diese hochionisierten Wolken konnten bislang nicht räumlich aufgelöst werden. Die hohe räumliche Auflösung, die NACO im Infrarotbereich liefert, wo einige der stärksten hochionisierten Linien abgestrahlt werden, ermöglicht uns nun jedoch eine genauere Untersuchung der Wolken. Daher führen wir am MPIA ein ehrgeiziges Programm durch mit dem Ziel, zum ersten Mal die Größe, Morphologie und Kinematik diese hochionisierten Wolken in den nächstgelegenen aktiven Galaxien zu bestimmen. Dazu verwenden wir NACO und die hohe spektrale Auflösung von Spektrographen wie ISAAC am VLT.

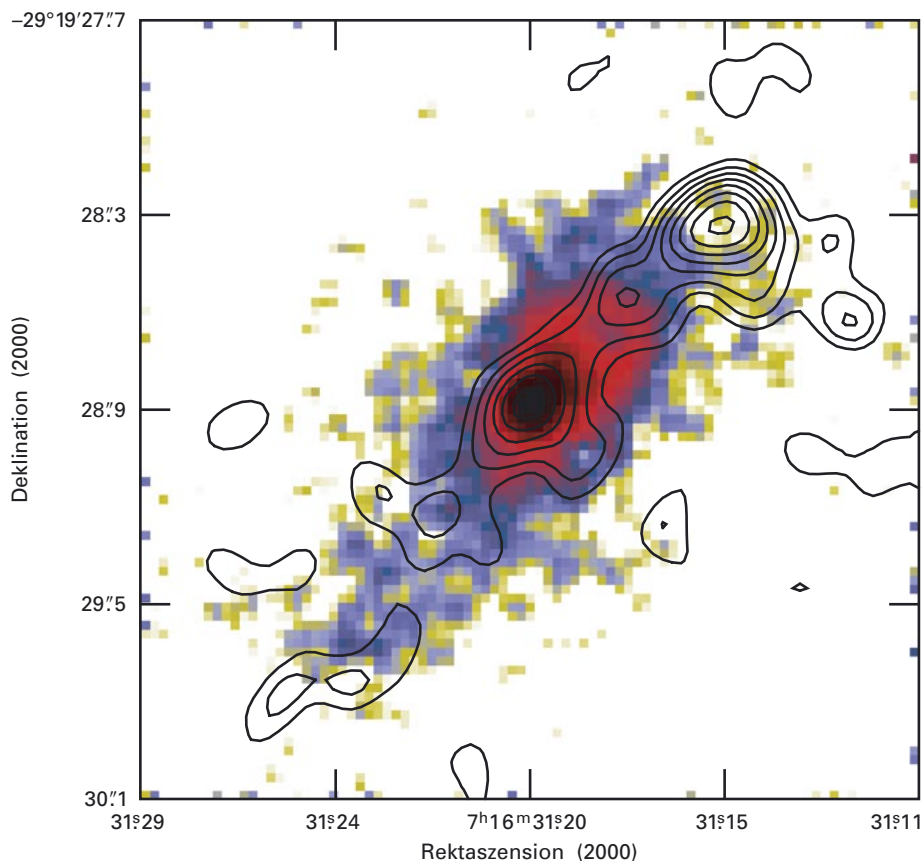
Erste Ergebnisse dieses Programms wollen wir anhand der nahen Galaxie ESO 428 veranschaulichen. Abb. III.3.5 zeigt eine NACO-Aufnahme dieser Galaxie in reinem Kontinuumslicht, die mit einem Schmalbandfilter bei $2.42\ \mu\text{m}$ gemacht wurde. Im Kontinuumslicht weist die Galaxie eine sehr glatte Lichtverteilung auf, wie man sie häufig in normalen elliptischen Galaxien findet. Bildet man jedoch das hochionisierte Gas ab, z.B. im Licht einer Si^{6+} -Linie bei $2.48\ \mu\text{m}$, ist die Morphologie eine völlig

andere: Abb. III.3.6 zeigt eine helle Quelle im Zentrum (den Kern) und eine längs einer Vorzugsrichtung ausgehende diffuse Strahlung. Diese stimmt erstaunlich gut mit der Richtung der bekannten Radiojets überein, die in entgegengesetzten Richtungen vom Kern ausgehen.

Diese Radiojets sind höchstwahrscheinlich durch magnetisch angetriebene Winde von der Akkretionsscheibe abgeblasen worden. Die mit unseren NACO-Bildern gemachte wichtige Entdeckung besteht darin, dass das hochionisierte Gas entweder in einem extrem gebündelten Wind entlang derselben Richtung abströmt wie die Jets oder aber ein eher lokales Phänomen ist, hervorgerufen durch den Zusammenprall der Plasmajets mit dem interstellaren Medium, auf das sie auf ihrem Weg nach außen treffen.

Die Linienprofile dieses hochionisierten Gases deuten häufig auf sehr hohe Geschwindigkeiten von bis zu $2000\ \text{km/s}$ hin. Noch bedeutsamer ist, dass sie verglichen mit den Linien niedriger oder mittlerer Ionisationsgrade, die

Abb. III.3.6: Die gleiche Galaxie wie in Abb. III.3.5, hier jedoch im Licht der verbotenen Emissionslinie von Si^{6+} bei $2.48\ \mu\text{m}$; gezeigt sind nur die zentralen $400\ \text{pc} \times 400\ \text{pc}$. Die Konturen stellen die Radiojets dar, die von einer hellen Zentralquelle, dem aktiven Kern, ausgehen. Die übereinstimmende Ausrichtung des Radioplasmas und des hochionisierten Gases ist deutlich sichtbar.



schmal und symmetrisch sind, systematisch breite asymmetrische Flügel zum Blauen hin zeigen. Dies wird üblicherweise durch Staubextinktion im Torus erklärt, die den näher gelegenen, auf uns zu kommenden Teil des bipolaren Windes weniger beeinträchtigen würde als den entfernten, zurückweichenden.

Aufnahmen mit hoher räumlicher Auflösung wie die von ESO 428 (Abb. III.3.6) zeigen jedoch, dass das hochionisierte Gas auf beiden Seiten des Kerns sichtbar ist. Daher sollte, falls die Vorstellung einer bipolaren Abströmung richtig ist, das Linienprofil sowohl blaue als auch rote Flügel zeigen. Spektrographen mit höherer räumlicher Auflösung, wie der seit kurzem am VLT verfügbare SINFONI, sollten uns die Erklärung für diesen sonderbaren Widerspruch liefern.

Wie das Schwarze Loch von der umgebenden Galaxie gespeist wird

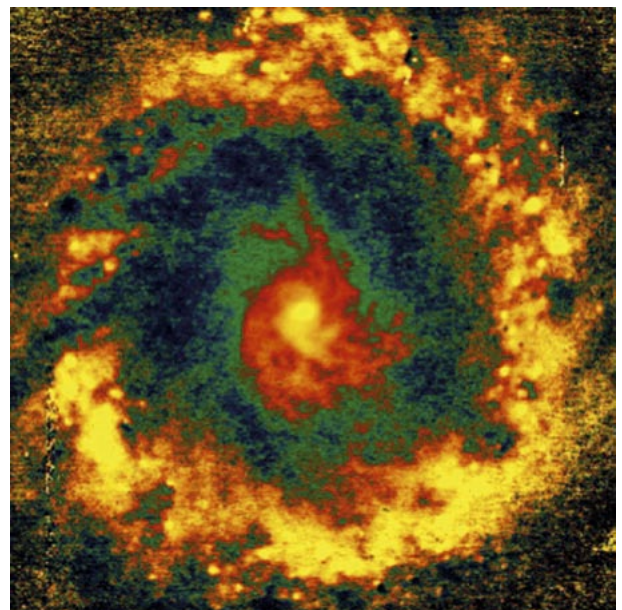
Falls Akkretion auf ein Schwarzes Loch tatsächlich für die äußerst energiereichen Phänomene in Galaxienzentren verantwortlich ist, muss das Schwarze Loch stetig über eine Akkretionsscheibe mit Nahrung versorgt werden, damit es aktiv bleibt. Das Material, das die Akkretionsscheibe beliefert, kann aus der umgebenden Galaxie stammen (Molekülwolken und Gas, das von Sternen durch Sternwinde und Supernovae ausgestoßen wird) oder von außen kommen (z.B. von der Galaxie

bei Wechselwirkungen oder Zusammenstößen mit einer Nachbargalaxie eingefangene Gaswolken) oder aber aus dem Galaxienzentrum selbst stammen (z.B. stellarer Massenverlust im zentralen Sternhaufen, verstärkt durch Heizung, die vom Kern ausgeht). Einen direkter Eindruck, wie das unmittelbare Zentrum einer aktiven Galaxie mit Material beliefert wird, vermitteln zum ersten Mal Bilder der nahen Galaxie NGC 1097, die NACO im nahen Infrarot aufgenommen hat.

Abb. III.3.7 zeigt eine Kompositaufnahme dieser Galaxie, gewonnen mit NACO bei $1\ \mu\text{m}$ bis $2.5\ \mu\text{m}$. Die Abbildung zeigt den berühmten Ring aus Sternentstehungsgebieten in NGC 1097 in ihrem vollen Umfang. Dank ihrer hohen räumlichen Auflösung sowie der Tatsache, dass sie bei Infrarotwellenlängen gemacht wurde, zeigt diese NACO-Aufnahme in diesem Ring mehr als 300 Sternentstehungsgebiete (weiße Flecken in der Abbildung), viermal mehr als bisher von optischen HST-Aufnahmen her bekannt waren. Im Zentrum des Rings wird ein mäßig aktiver Kern langsam mit Materie gespeist. Im Gegensatz zu extrem aktiven Quasaren, wo das Licht des Kerns das Licht der rund 10^{11} Sterne in der Wirtsgalaxie bei weitem überstrahlt, sind mäßig aktive Kerne wie NGC 1097 gewöhnlich im alles überflutenden Sternlicht eingebettet, das als die helle, diffuse Strahlung in der gesamten Abbildung zu erkennen ist. Einige Kerne sind zusätzlich noch von großen Staubkonzentrationen verdeckt, in die sie eingehüllt sind. Im Fall von NGC 1097 war es möglich, das Sternlicht durch die Erzeugung

Abb. III.3.7: Mit NACO gewonnene Kompositaufnahme der zentralen 2 kpc von NGC 1097. Die Farben entsprechen Strahlung bei folgenden Wellenlängen: rot – $2\ \mu\text{m}$, grün – $1.7\ \mu\text{m}$, blau – $1.2\ \mu\text{m}$. Über 300 Sternentstehungsgebiete (weiße Flecken auf der Aufnahme) sind in einem Radius von 700 pc um eine helle Zentralquelle verteilt, die den zentralen Kern markiert.

Abb. III.3.8: Mit NACO gewonnene Farbdifferenzkarte J-K der Galaxie NGC 1097. Der aktive Kern ist die helle Quelle im Zentrum; sie ist von einem Netzwerk aus Filamenten umgeben, über die Material zur Akkretionsscheibe geleitet wird. Von dort aus wird es schließlich vom zentralen Schwarzen Loch verschluckt.



eines einfachen Farbbildes zu unterdrücken: Abb. III.3.8 zeigt unsere mit NACO gewonnen Karte, die durch Subtraktion der Farben J-K erzeugt wurde. Da die Sterne bei J und K gleich hell erscheinen, wird der Großteil des diffusen Sternlichts bei der Subtraktion entfernt, sodass ein heller Kern im Zentrum zutage tritt. Der Ring aus Sternentstehungsgebieten hat ebenfalls eine röttere Farbe und bleibt daher auf der Farbkarte deutlich sichtbar.

Die Größe dieses Kerns, hier begrenzt durch die räumliche Auflösung der Aufnahmen, liegt unter 10 pc. Die Farbkarte zeigt zudem ein komplexes Netzwerk aus Filamenten, die um das Zentrum spiralen. Diese Filamente sind Indikatoren für kalten Staub und Gas, die ins Zentrum transportiert werden und dort den zentralen Motor speisen.

Zusammenfassung

Die oben diskutierten Beispiele veranschaulichen die Fülle an Informationen über Kerne aktiver Galaxien, die mit Hilfe der am MPIA gebauten neuen Generation hochauflösender Instrumente gewonnen werden können. Ausgehend von aufgelösten MIDI- und NACO-Aufnahmen der Gas- und Staubringe in den innersten Parsec von NGC 1068 und der Circinus-Galaxie haben wir den Leser weiter nach außen geführt: eine Gasscheibe von etwa 18 Parsec Durchmesser befindet sich immer noch innerhalb der Einflussphäre des Schwarzen Lochs. Damit können wir dessen Masse bestimmen. Jets und

Abströmungen aus hochionisiertem Gas von der zentralen Akkretionsscheibe sind wichtige Indikatoren der Kernaktivität, deren Wirkung noch in einigen Dutzend Parsec Entfernung spürbar sein kann. Um den Prozess zu verstehen, durch den das Schwarze Loch mit Nahrung versorgt wird und damit aktiv bleibt, muss man herausfinden, wie Material aus Hunderten oder Tausenden Parsec Entfernung nach innen Richtung Zentrum geleitet wird und dort schließlich zunächst in den Torus und von dort in die Akkretionsscheibe gelangt. Obwohl sich unser aktueller Bericht auf Infrarotbeobachtungen konzentriert, wird unsere Untersuchung keineswegs andere Bereiche des elektromagnetischen Spektrums ausschließen. Parallel zu den Beobachtungen sind weitere intensive theoretische Arbeiten an dynamischen Modellen zur Bestimmung der Massen Schwarzer Löcher und an Strahlungstransportmodellen zur Reproduktion spektraler Energieverteilungen von Galaxienkernen im Gange. Bei unserem Streben nach einem besseren Verständnis von Galaxienkernen sehen wir weiteren spannenden Erkenntnissen erwartungsvoll entgegen.

*(Almudena Prieto, Klaus Meisenheimer,
Nadine Häring, Hans-Walter Rix,
Marc Schartman, Konrad Tristram;
in Zusammenarbeit mit Kollegen der
Landessternwarte Heidelberg, MPIfR/Bonn,
ESO, Sterrewacht Leiden, Tel-Aviv University,
IAG/Brazil und Bucknell University/USA)*

III.4 Brennstoff für die zentrale Kiloparsec-Region oder: Wie aktiviert man Galaxiezentren?

Die Zentralregion einer Spiralgalaxie ist ein besonderer Ort. Ein deutlicher Anteil der Spiralgalaxien zeigt Aktivität in Form (heftiger) Sternentstehung oder gar leuchtender galaktischer Schwarzer Löcher. Diese Aktivität benötigt offenbar einen Brennstoff, der vermutlich in Form von molekularem Gas geliefert wird. Relativ unklar ist bisher jedoch, wie dieses Material in das unmittelbare Zentrum geleitet wird. Zahlreiche verschiedene Modelle sind vorgeschlagen worden, doch erst jetzt, nachdem mit Hilfe von Interferometern Beobachtungen mit höchster Winkelauflösung im Millimeterspektralbereich möglich sind, können diese Modelle auch am Teleskop getestet werden.

Im Rahmen unserer Strategie, Galaxien und kosmologische Theorien in vielen verschiedenen Wellenlängenbereichen zu untersuchen, haben wir am Max-Planck-Institut für Astronomie kürzlich begonnen, auf diesen Gebieten aktiv an kombinierten Beobachtungen im nahen Infrarot, (Sub-)Millimeter- und Radiobereich teilzunehmen. Astronomen am MPIA spielen eine führende Rolle in mehreren großen internationalen Kollaborationen zur Untersuchung naher Galaxien. Zwei Durchmusterungen mit starker Beteiligung des MPIA sind das »Galaxienkern-Projekt« (»Nuclei of Galaxies projekt«, NUGA, Eva Schinnerer) sowie die »SPITZER-Infrarot-Durchmusterung naher Galaxien« (»SPITZER-Infrared Nearby Galaxy Survey«, SINGS, F. Walter, J. Cannon), einer der sechs »SPITZER Legacy Surveys«. Zusätzlich leiten MPIA-Astronomen zwei der wenigen »Großprojekte« am Very Large Array (VLA) des National Radio Astronomy Observatory (NRAO), die mit Untersuchungen bei verschiedenen Wellenlängen verknüpft sind: »The HI Nearby Galaxy Survey«, THINGS (F. Walter, PI und F. Bigiel) und VLA-COSMOS, welches der Untersuchung des fernen Universums gewidmet ist (Eva Schinnerer, V. Smolcic). Weitere detaillierte Untersuchungen in diesem Zusammenhang beinhalten Radio/mm-Beobachtungen der Wirtsgalaxien der entferntesten Quasare und von Sub-Millimeter-Galaxien (F. Walter, K. Knudsen, D. A. Riechers).

Hier wollen wir einen kurzen Überblick über die Anstrengungen geben, die zur Zeit unternommen werden, um die Prozesse der Brennstoffzufuhr in nahen Galaxien besser zu verstehen. Dies ist nur ein Aspekt der Studien bei verschiedenen Wellenlängen, welcher durch zusätzliche Informationen aus dem langwelligen Bereich erschlossen wird. Neueste Ergebnisse der anderen in vielen verschiedenen Wellenlängenbereichen durchgeführten Beobachtungsprogramme werden in den nächsten Berichten vorgestellt werden.

Was macht Galaxiezentren zu besonderen Orten?

Im Allgemeinen können die Zentren von (Spiral-) Galaxien leicht anhand ihres Überschusses an Sternlicht identifiziert werden. Ein deutlicher Anteil nahegelegener Galaxien zeigt auch Anzeichen für eine zusätzliche Kernaktivität, entweder in Form von jüngster oder noch andauernder heftiger Sternentstehung, oder durch die Existenz eines aktiven Galaxienkerns (AGN). Man geht davon aus, dass ein AGN entsteht, wenn ein ruhiges, massereiches Schwarzes Loch durch einfallendes Gas aus seiner umgebenden Wirtsgalaxie gespeist wird.

Diese Arten von Kernaktivität sind ziemlich überraschend. Denn eigentlich sollte man erwarten, dass die unmittelbaren Zentren von Galaxien keine geeigneten Orte für Sternentstehung sind, da starke Gezeiten- und Scherkräfte an den Molekülwolken zerren und die starken UV-Strahlungsfelder der dichten Sternpopulationen zur Aufheizung und Photo-Dissoziation des molekularen Gases führen. Jüngste Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE bei optischen und nahen Infrarotwellenlängen haben jedoch gezeigt, dass in den photometrischen Zentren von Spiralgalaxien aller Hubble-Typen sehr häufig kompakte (Durchmesser in der Größenordnung einiger Parsec), photometrisch deutlich erkennbare Sternhaufen vorhanden sind. Überraschenderweise stellt sich heraus, dass die Strahlung vieler genauer untersuchter Sternhaufen in galaktischen Kernen von einer jungen Sternpopulation mit einem Alter von unter 100 Millionen Jahren dominiert wird. Diese Galaxien müssen offenbar in jüngster Zeit einen deutlichen Zustrom an molekularem Gas – dem Material für Sternentstehung – in ihre unmittelbaren Zentralregionen erfahren haben, damit eine solche Sternentstehung möglich war.

Die Verbindung zwischen der Wirtsgalaxie und ihrem zentralen Motor stellt nach wie vor ein Dilemma der AGN-Forschung dar. Neueste Modelle der Speisung von AGN und der Vereinheitlichung von AGN-Typen beinhalten beobachtbare Effekte in den Wirtsgalaxien, die sich auf Skalen von einigen zehn bis etwa 1000 pc abspielen (zum Beispiel ineinandergeschachtelte Balken, Kernscheiben und Staub). Man geht davon aus, dass AGN-Aktivität in Galaxien eng mit der Verfügbarkeit von (molekularem) Gas direkt im Zentrum zusammenhängt. Aus der Anzahllichte naher AGN ergibt sich eine »Einschaltdauer« von etwa 100 Millionen Jahren. Somit muss der Speisungsmechanismus in der Lage sein, das Gasreservoir im Kern in diesem Zeitraum wieder aufzufüllen.

Unsere gegenwärtige Vorstellung von der Brennstoffzufuhr in Galaxienkerne

Obwohl sich langsam ein mögliches Szenario für die Speisung von Galaxienzentren herausbildet, gibt es nach wie vor eine Fülle unbeantworteter Fragen. Es besteht keine Einigkeit bezüglich des genauen Mechanismus, der den Einfall von Gas in das eigentliche Galaxienzentrum antreibt. Auf großräumigen Skalen wurde vorgeschlagen, dass dynamische Störungen (z.B. Zusammenstöße von Galaxien, Verschmelzungen und Akkretion von Materie), Balken, Spiralarme und ihre gravitativen Drehmomente den Einfall von Gas bis hinab zu Skalen von etwa dem zentralen Kiloparsec antreiben. So werden zum Beispiel bei mindestens 75 % aller Spiralgalaxien Balken beobachtet, und man glaubt, dass sie eine Schlüsselrolle in diesem Prozess spielen, indem sie Gas von der äußeren großräumigen Scheibe in den zentralen 1 Kiloparsec großen Bereich transportieren. Numerische Simulationen haben gezeigt, dass durch den Balken ausgeübte Drehmomente gasförmiges Material sehr effizient in das Zentrum einer Galaxie befördern können, und genauere Vergleiche großräumiger Eigenschaften einzelner Galaxien mit dynamischen Modellen zeigen eine recht gute Übereinstimmung.

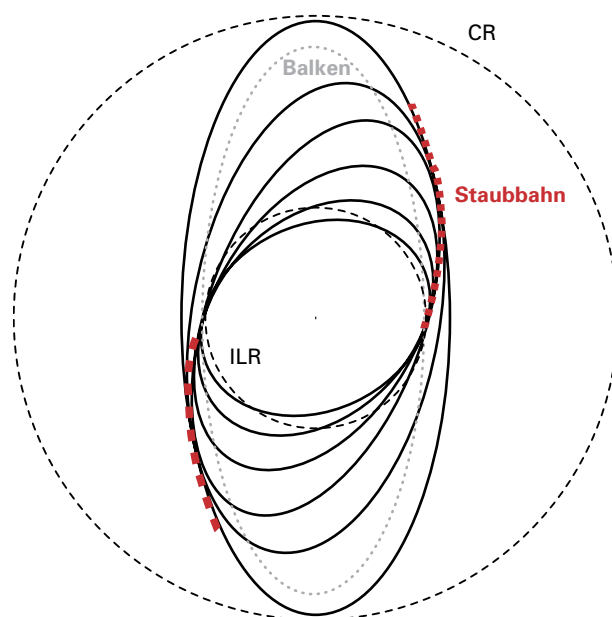
Für die großräumigen Gasströmungen hat man insgesamt ein relativ gutes Modell. Um jedoch den sehr effizienten Massentransport von der Kiloparsec-Skala in die innersten 100 pc zu erklären, muss man sich mit dem keineswegs trivialen Problem befassen, wie der Drehimpuls abgeführt werden kann. Zunächst wurden sekundäre oder innere Balken vorgeschlagen, die die letzten paar Parsec überbrücken sollten. Doch neuerdings wurde angeregt, dass andere Mechanismen, z.B. $m = 1$ Moden wie schräg liegende Scheiben oder einarmige Spiralen und/oder Gasdichtewellen, genauso wichtig oder wichtiger sind. Ebenso ist möglich, dass das Einstromen von Gas zunächst zu einem Ausbruch von Sternentstehung (»Starburst«) im Kern führt und dann die durch Gezeiten auseinander gerissenen Sterne dieses neu im Kern gebildeten Sternhaufens den AGN speisen. Somit ist das seit langem bestehende Problem des Brennstofftransports in die zentrale Kiloparsec-Region nach wie vor ungelöst und stark umstritten. Es ist ziemlich schwierig, Modelle für die Gasströmung auf Skalen von wenigen zig Parsec in der Praxis zu überprüfen, da hierzu eine hohe räumliche Auflösung und damit auch hohe Winkelauflösung nötig ist. Bislang stehen nur für einige wenige Galaxien Daten hoher Qualität zur Verfügung, um Vorhersagen der Modelle zu überprüfen. Aber man hat auch gerade erst begonnen, Modelle für die Gasströmung im innersten Kiloparsec-Bereich zu erstellen.

Ein vereinfachtes Bild einer Gasströmung aufgrund eines großräumigen stellaren Balkens (von einigen kpc Länge) kann wie folgt beschrieben werden (siehe Abb. III.4.1): Jedes rotierende Muster (wie ein Balken oder

Spiralarme) in einer differentiell rotierenden Scheibe führt zu Resonanzen. Insbesondere der Ort der Korotationsresonanz ist für Gasströmungen von Bedeutung. Der Radius der Korotationsresonanz ist der Ort, wo die Winkelgeschwindigkeit des Musters gleich der Winkelgeschwindigkeit aufgrund des Gravitationspotentials ist. Die Drehmomente, die z.B. von einem stellaren Balken ausgeübt werden, führen dazu, dass sich das Gas von dieser Resonanz fortbewegt. Daher wandert sämtliches Gas innerhalb der Korotationsresonanz in Richtung Zentrum.

Ist ein stellarer Balken vorhanden, so sammelt sich das Gas längs der Vorderseiten des rotierenden Balkens an und bildet Staubbänder. In einem solch einfachen Bild (Abb. III.4.1) sind die Umlaufbahnen einzelner Gaswolken nicht mehr kreisförmig, sondern elliptisch. Zudem sind diese elliptischen Bahnen gegeneinander geneigt, wodurch das Gas jedes Mal, wenn die Gaswolke in das Gebiet der Staubbänder eintritt, Drehimpuls verliert. Je nach der genauen Form des Gravitationspotentials und den Eigenschaften des stellaren Balkens können sich die Gaswolken in der Zentralregion ansammeln und eine

Abb. III.4.1: Schematische Ansicht der Gasströmung in einer Spiralgalaxie mit einem großräumigen stellaren Balken (grau gestrichelt). Die ungefähren Positionen zweier für die Speisung der Kernaktivität wichtiger Resonanzen sind angegeben (schwarz gestrichelt): Die Ko-Rotationsresonanz (CR) und die Innere Lindblad-Resonanz (ILR). Kurz ausgedrückt kann das zwischen diesen beiden Resonanzen liegende Gas Drehimpuls verlieren und näher an die Kernregion strömen. Idealisierte Umlaufbahnen der Gasströmungen sind als schwarze Ellipsen dargestellt. Wo die Ellipsen einander nahe kommen, können Gaswolken durch Stoßwellen sehr effizient Drehimpuls verlieren. Diese Regionen sind als so genannte Gas- und/oder Staubbänder (rot gestrichelt) in den Scheiben von Balken-Spiralgalaxien deutlich erkennbar.



glatte Scheibe bilden, oder bei einer weiteren Resonanz näher am Kern angehalten werden. Man nimmt an, dass diese so genannte Innere Lindblad-Resonanz (ILR) die Ursache für die prächtigen Ringe mit ausbruchartiger Sternentstehung ist, die man um die Kerne zahlreicher Spiralgalaxien beobachtet. Um die Gaswolken noch näher an das Zentrum einer Spiralgalaxie heranzubringen, hat man die Vorstellung von ineinandergeschachtelten Balken (oder Doppelbalken) zu Hilfe gerufen. In diesem Szenario wirkt ein kleinerer innerer (oder Kern-)Balken auf ähnliche Weise wie der großräumige (äußere) Balken: Die Gaswolken verlieren ihren Drehimpuls aufgrund der länglichen Umlaufbahnen und der damit verknüpften Stoßwellen und bewegen sich zu immer kleineren Radien hin.

Beobachtung der Kinematik des molekularen Gases mit Hilfe von Millimeter-Interferometrie

Die Untersuchung von interstellarem Gas ist von wesentlicher Bedeutung für das Verständnis galaktischer Aktivität. Im zentralen Kiloparsec-Bereich von Spiralgalaxien ist das Gas dicht und besteht aus Molekülen. Deshalb sind die CO-Linien im Millimeterbereich am geeignetsten, die Gasdynamik im Kern zu verfolgen. Heutige Millimeter-Interferometer können problemlos Winkelauflösungen von einigen Bogensekunden erzielen. Eines der besten heute verfügbaren Instrumente ist das Interferometer auf dem Plateau de Bure (PdBI, siehe Abb. III.4.2) des Instituts für Radioastronomie im Millimeterbereich (IRAM). Es befindet sich in den französischen Alpen in etwa 2500 m Höhe und arbeitet in den atmosphärischen Fenstern bei 3 und 1 mm. Wenn im Winter die besten Beobachtungsbedingungen herrschen (d.h. geringer Wasserdampf und eine stabile Atmosphäre), sind bei einer Wellenlänge von 1 mm sogar

Beobachtungen mit einer Auflösung unter einer Bogensekunde möglich. Eine typische Spiralgalaxie besitzt in ihrem zentralen Kiloparsec-Bereich große Mengen an molekularem Gas mit einer Linienbreite von größenordnungsmäßig 200 km/s. Die mit Millimeter-Interferometern erzielte spektrale Auflösung ist hervorragend; beim PdBI beträgt sie typischerweise etwa 5 km/s. Dies ermöglicht eine ausgezeichnete Erfassung der CO-Linien und damit die Untersuchung der Kinematik des molekularen Gases in Galaxienzentren.

Beobachtungen sind entscheidend für weiteren Fortschritt

Beobachtungen der Kinematik des molekularen Gases in der zentralen Kiloparsec-Region naher Spiralgalaxien sind entscheidend für die Überprüfung aktueller Modelle der Brennstoffzufuhr in Galaxienzentren. Einerseits kann man mit ihnen testen, welche physikalischen Eigenschaften den Prozess der Brennstoffzufuhr bestimmen – z.B. die Form des galaktischen Potentials,

Abb. III.4.2: Das Millimeter-Interferometer des IRAM (Institut für Radioastronomie im Millimeterbereich) auf dem Plateau de Bure. Das Instrument liegt im Süden der französischen Alpen in etwa 2500 m Höhe. Es besteht zur Zeit aus sechs 15-m-Antennen, die bis zu 400 m auseinander gefahren werden können. Die Beobachtungen werden in den atmosphärischen Fenstern bei 3 mm und 1 mm Wellenlänge durchgeführt. Die wichtigsten Linien für Untersuchungen der Gasströmungen in nahen Galaxien sind die beiden niedrigsten Übergänge des ^{12}CO -Moleküls bei 115 GHz und 230 GHz. Unter Verwendung der größten Basislängen von bis zu 400 m beträgt die entsprechende Winkelauflösung, die bei diesen Frequenzen erreicht werden kann, 1.0 bzw. 0.5 Bogensekunden. (Mit freundlicher Genehmigung von IRAM).



Stoßwellen in der Gaskomponente, Rückkopplung von Sternentstehung oder Supernovaexplosionen. Andererseits erlauben sie auch dank der heute mit modernen Millimeter-Interferometern erreichbaren hohen räumlichen Auflösung direkte Tests der von den Modellen gemachten Vorhersagen. Im Folgenden stellen wir einige Beispiele vor, die ein Schlaglicht auf die in den letzten Jahren erzielten Fortschritte werfen.

Sind Doppelbalken der Schlüssel zum Verständnis? Der Fall NGC 4303

NGC 4303 (M 61) beherbergt einen großräumigen Balken von etwa 3.1 kpc Länge, der innerhalb der auffälligen Spiralarme liegt. Zusätzlich zu diesen großräumigen Balken wurde im nahen Infrarotbereich ein zweiter, innerer Balken von etwa 300 pc Länge entdeckt. Er ist von einem etwa 0.5 kpc großen, den Kern umgebenden Ring oder einer Spirale umschlossen, in dem ausbruchartig vermehrte Sternentstehung stattfindet. UV-Bilder des HST konnten mehrere kompakte Sternentstehungsgebiete in diesem »Starburst«-Ring auflösen.

Die vorhergehende Untersuchung der Strömung des molekularen Gases im Kern der Doppelbalken-Galaxie NGC 4303 durch Schinnerer et al. bei hoher Winkelauflösung (~ 2 Bogensekunden) ermöglichte es, die vorhergesagten Gasströmungen in diesem Galaxientyp zu überprüfen. Die nachgewiesene Strahlung zeichnet zwei geradlinige Bänder nach, in denen starke Einström-bewegungen von bis zu 90 km/s beobachtet werden, ähnlich wie jene, die von Modellen für Galaxien mit starken großräumigen Einzelbalken vorhergesagt werden. Im inneren Kiloparsec-Bereich beginnen die Gasbänder sich zu einer Spiralstruktur zu winden, die im südlichen Spiralarm verzerrt ist. Detaillierte Vergleiche zwischen den hochaufgelösten Modellen der Gasströmung in Einzel- und Doppelbalkengalaxien und der CO-Strahlung aus dem inneren Kiloparsec-Bereich von NGC 4303 zeigen, dass die beobachtete Spiralstruktur durch einen Einzelbalken ausreichend gut erklärt werden kann (siehe Abb. III.4.3). Die Spiralstruktur ist jedoch auch mit einem Doppelbalkenmodell vereinbar, passt man dieses an das große Balkenlängenverhältnis (~ 15) an. Da sich der Großteil des molekularen Gases in den Gasbändern befindet und nicht in einem Kernring, dessen Bildung man sowohl im Einzelbalken- als auch im Doppelbalkenszenario erwartet, scheint es gut möglich, dass das um den Kern befindliche molekulare Gas wahrscheinlich erst gerade dabei ist, sich in der typischen ringförmigen Konfiguration niederzulassen.

Die Untersuchung von NGC 4303 hat gezeigt, dass die gesamte Gasströmung in einer Doppelbalkengalaxie mit derzeitigen dynamischen Modellen bereits erklärt werden kann – wenn auch nicht eindeutig. Die beobachtete Asymmetrie in der Gasverteilung der Galaxie ist jedoch nicht so einfach durch derzeit verfügbare Modelle

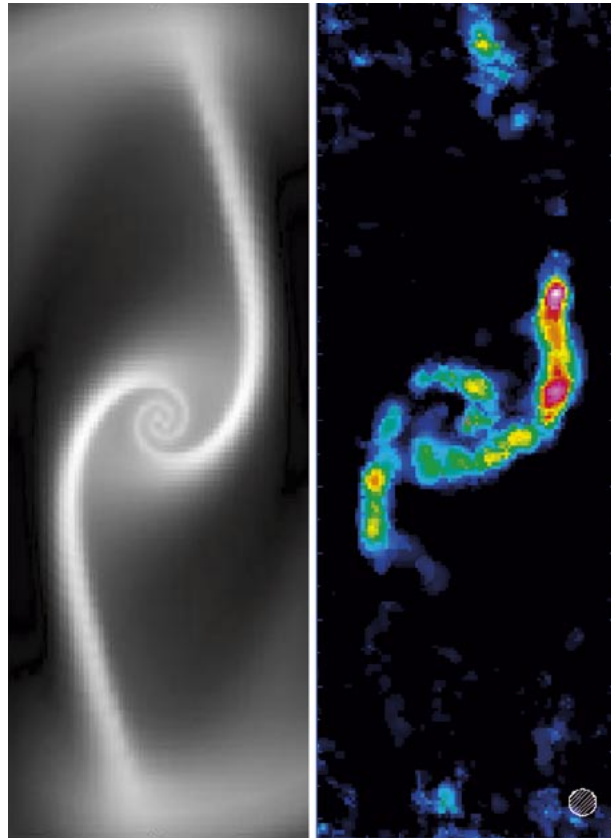


Abb. III.4.3. Vergleich der Modellvorhersagen für die Gasverteilung in einer Galaxie mit einem Einzelbalken (links, mit freundlicher Genehmigung von P. Englmaier) mit der beobachteten Verteilung des molekularen Gases in der Doppelbalkenspiralgalaxie NGC 4303 (rechts). Die Ähnlichkeit zwischen dem Modell und der beobachteten Verteilung der Strahlung in der ^{12}CO (1–0)-Linie ist frappierend und deutet darauf hin, dass die Kinematik des Gases selbst nahe am Zentrum von dem großräumigen Balken beherrscht wird. Der zweite, innere Balken in NGC 4303 ist klein im Vergleich zum äußeren Balken und passt ausgezeichnet in die Kernspiralarms. Bei der in unseren Daten erzielten Auflösung von 2 Bogensekunden ist kein deutlicher Effekt des Kernbalkens auf die Kinematik des Kerngases erkennbar.

erklärbar, und der Einfluss von Sternentstehung auf das molekulare Gas in der zentralen Kiloparsec-Region erfordert weitere Untersuchungen. Auf jeden Fall sind Beobachtungen weiterer Quellen unbedingt erforderlich, um festzustellen, ob NGC 4303 wirklich typisch für alle Doppelbalkengalaxien ist.

Speisung des Sternhaufens im Kern der späten Spiralgalaxien IC 342 und NGC 6946?

Es ist sehr wichtig, den Einspeisungsmechanismus von Sternhaufen im unmittelbaren Zentrum von Spiralgalaxien zu verstehen. Spiralgalaxien späten Typs sind ide-

ale Beobachtungsobjekte, weil bei ihnen ein ausgeprägter stellarer »Bauch« (engl. Bulge) fehlt und Sternhaufen im Kern daher leicht zu identifizieren sind. Zwei Fallstudien sollen hier vorgestellt werden, bei denen die am MPIA tätige Astronomin E. Schinnerer zusammen mit T. Böker (ESA, Niederlande), D. S. Meier (Univ. Illinois, USA), U. Lisenfeld (IAA, Spanien) und E. Emsellem (CRL, Frankreich) Hinweise auf Gasströmungen genau in Richtung Zentrum gefunden haben.

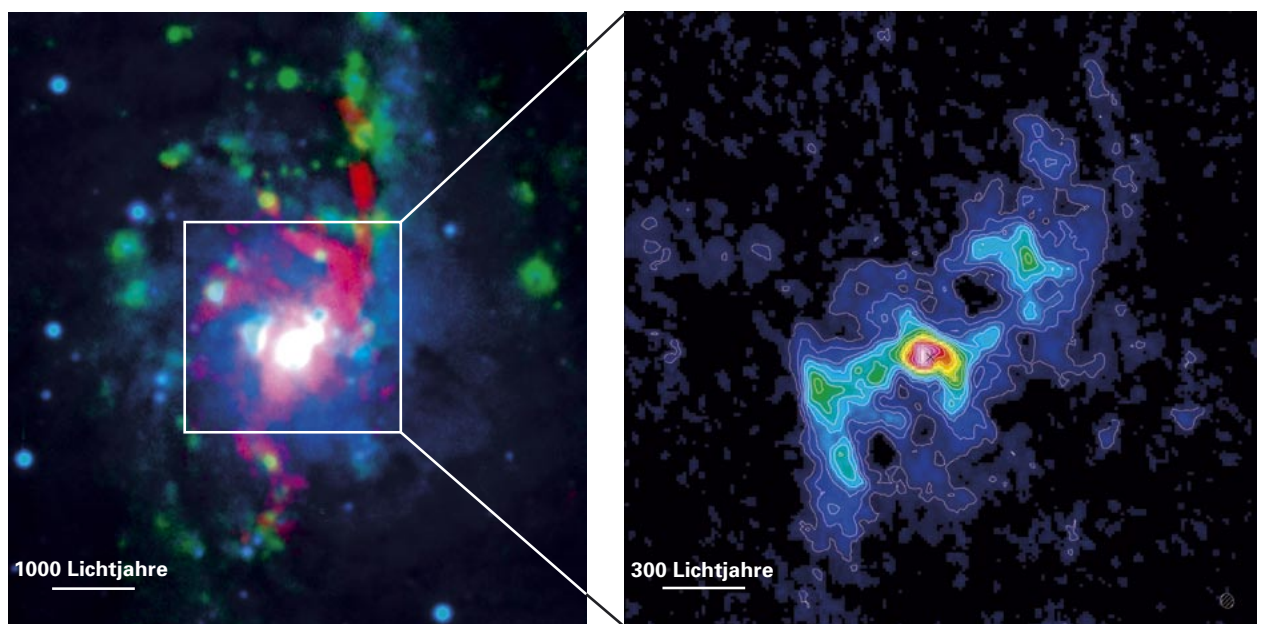
IC 342 ist ein klassisches Beispiel für eine Spiralgalaxie späten Typs mit einem jungen Kernhaufen. Wie zahlreiche spektroskopische und abbildende Beobachtungen im nahen Infrarot zeigen, beherbergt sie in ihrem Kern einen leuchtkräftigen Sternhaufen mit etwa 10^6 Sonnenmassen, der in einem kurzfristigen Sternentstehungsausbruch vor etwa 60 Millionen Jahren entstand. Als die nächstgelegene ($D = 1.8$ Mpc) Spiralgalaxie mit intensiver Sternentstehung im Kern bietet sie eine einzigartige Möglichkeit, die damit verbundene Gasdynamik auf Skalen von wenigen Parsec (~ 4.5 pc, entsprechend 0.5 Bogensekunden in der Entfernung von IC 342) zu untersuchen. Die Zentralregion von IC 342 ist mit mittlerer Auflösung (2.5 – 4 Bogensekunden) in mehreren Moleküllinien wie z.B. den (1-0)-Übergängen von ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O und HCN kartiert worden, die den physikalischen Zustand des molekularen Gases im Kern erken-

nen lassen. Der etwa 10 Bogensekunden große Ring aus molekularem Gas ist auf allen Karten zu sehen und zeigt Anzeichen für starke Strömungsbewegungen. Unsere neuesten Beobachtungen von ^{12}CO (2-1) mit einer Auflösung von 1.2 Bogensekunden brachten zum ersten Mal eine 30 pc große Scheibe aus molekularem Gas zum Vorschein, die sich mit dem Sternhaufen im Kern deckt. Diese Scheibe ist über zwei schwache CO-Brücken mit dem zirkumnuklearen Ring verbunden. Die Kinematik ihres Gases zeigt Hinweise auf nichtkreisförmige Bewegung. Interpretiert man diese als Gaseinströmung in das Zentrum von IC 342, so erhält man für die Einströmrates eine grobe Abschätzung von 0.003 bis 0.14 $M_{\text{Sonne}}/\text{Jahr}$. Das ist hoch genug, um den Materialvorrat für zukünftige Sternentstehungsereignisse wieder aufzufüllen. Unsere neuesten PdBI-Beobachtungen der molekularen Linienemission von HCN , die kaltes, dichtes, molekulares Gas aufspürt, zeigen, dass diese Gasscheibe im Kern tatsächlich die nötigen Eigenschaften besitzt, damit Sternentstehung stattfindet. Weitere Beobachtungen mit noch höherer Auflösung (unter einer Bogensekunde) der ^{12}CO (2-1)- und anderer Moleküllinien sind gegenwärtig am PdBI-Interferometer im Gange.

NGC 6946 ist ein hervorragendes Beispiel für eine Spiralgalaxie späten Typs mit einem auffälligen Sternentstehungsausbruch im Kern. Die Sternentstehungsge-

Abb. III.4.4: Die Verteilung des molekularen Gases in der Kernregion der Spiralgalaxie späten Typs NGC 6946. Die Farbkompositaufnahme (links) zeigt die Verteilung der ^{12}CO (1-0)-Linienemission (rot) im Vergleich zum Licht junger HII-Regionen, sichtbar gemacht durch ihre $\text{H}\alpha$ -Linienemission (grün), sowie zum Licht alter Sternpopulationen in der Scheibe (blau). Der Kern von NGC 6946 bildet aktiv neue Sterne und zeigt auch das Vorhandensein großer Mengen an molekularem Material für die Sternentstehung. Die Verteilung des moleku-

laren Gases in den inneren 300 pc, sichtbar gemacht durch die ^{12}CO (2-1)-Linienemission bei einer Auflösung von 0.6 Bogensekunden (rechts), zeigt eine S-Form, die an die Staub/Gasbänder entlang großräumiger Balken erinnert. Dieses Bild wird gestützt durch die jüngste Entdeckung eines kleinen inneren Balkens im nahen Infrarotbereich. Für die Bestätigung, dass dieser Balken tatsächlich die Gasverteilung in den inneren 300 pc geformt hat und das Gas näher an den Kern transportiert, sind jedoch Modellrechnungen nötig.



schichte der innersten 8 Bogensekunden (etwa 230 pc) kann durch zwei jüngere Ausbruchereignisse vor etwa 5 und 15 Millionen Jahren beschrieben werden, bei denen jeweils rund $(5-10) \times 10^7$ Sonnenmassen an molekularem Gas in Sterne umgewandelt wurden. Die abgeleitete Extinktion von $A_V \approx 10$ mag in Richtung der Kernregion ist überraschend hoch angesichts der Tatsache, dass wir fast genau von oben auf das System blicken. Als eine der nächsten ($D = 5.5$ Mpc) Galaxien mit intensiver Sternentstehung im Kern bietet NGC 6946 eine einmalige Gelegenheit, die Dynamik ihrer zirkumnuklearen Scheibe aus molekularem Gas zu untersuchen. In dieser Entfernung erfasst die vom PdBI bei 1 mm Wellenlänge gelieferte Auflösung von 0.6 Bogensekunden räumliche Skalen von nur etwa 15 pc.

Die Verteilung des molekularen Gases im Zentrum wurde durch unsere neuen PdBI-Beobachtungen in eine S-förmige Struktur aufgelöst (Abb. III.4.4). Die CO(1-0)-Linienemission erfasst die großräumigere Verteilung in der zentralen Bogenminute und zeigt, dass die Verteilung des molekularen Gases im Allgemeinen dem Muster jüngster Sternentstehung ähnelt. Dennoch liegen das molekulare Gas und die jungen HII-Regionen räumlich nicht beieinander. In den zentralen 300 pc erinnert die Verteilung des molekularen Gases sehr stark an die Gas/Staubbänder, die man entlang großräumiger Kiloparsec-Balken findet. Der im nahen Infrarot entdeckte stellare Balken im Kern könnte eine mögliche Erklärung hierfür sein. Eine vorläufige Auswertung der Kinematik des molekularen Gases deutet darauf hin, dass tatsächlich Gas durch Stoßwellen entlang der Vorderseiten dieses rotierenden Nahinfrarot-Balkens in die zentralen ~ 30 pc gelenkt wird. Eine genauere Auswertung ist nötig, um die möglichen Einstromraten in das unmittelbare Zentrum abschätzen zu können. Die hohe Extinktion und die Existenz mehrerer junger Sternentstehungsgebiete innerhalb der zentralen 100 pc machen diese Galaxie jedoch zu einem idealen Objekt, um das Wechselspiel zwischen Gasdynamik und Sternentstehung zu untersuchen.

Sind sich alle Galaxiezentren ähnlich? Das Schlüsselprojekt NUGA am PdBI des IRAM

Das Galaxienkern-Projekt NUGA (Nuclei of Galaxies project) ist die erste CO-Durchmusterung nahegelegener aktiver Galaxiezentren mit einer Auflösung unter einer Bogensekunde. NUGA ist eine im Wesentlichen europäische Kollaboration zwischen Wissenschaftlern folgender Einrichtungen: MPIA, MPE, MPIfR, Universität Köln, Nationales Astronomisches Observatorium Spaniens, Observatoire de Paris, CSIC/Spain, Institut für Radioastronomie in Italien und Astronomisches Institut Basel.

Mit NUGA sollen die verschiedenen Mechanismen der Gaszufuhr in aktive Galaxiezentren systematisch unter-

sucht werden. Bei einer sorgfältig ausgewählten Stichprobe naher AGN, die sämtliche Stadien der Kernaktivität überdeckt (Seyfert-Galaxien, LINERS, Starburst-Galaxien und Übergangsobjekte), wurde die Kinematik des molekularen Gases bei 1 mm und 3 mm mit maximaler Winkelauflösung (~ 0.5 Bogensekunden) und spektraler Auflösung (3-6 km/s) abgebildet. Aufgrund der zehnfach höheren Empfindlichkeit gegenüber anderen Millimeter-Durchmusterungen liefern die NUGA-Daten einzigartige Informationen über die Kinematik innerhalb der innersten Bogenminute der jeweiligen Galaxie.

Bislang war es stets schwierig, statistische Beweise für die Rolle zu finden, die großräumige Balken und Störungen durch gravitative Wechselwirkungen bei der Brennstoffzufuhr in AGN spielen. Der Grund dafür ist, dass diese großräumigen Störungen Zeitskalen aufweisen, die erheblich länger sind als die, welche die Einschaltdauer der AGN kennzeichnen. Jede mögliche Korrelation muss daher sehr viel näher am Kern gesucht werden, in sekundären Erscheinungsformen, die in den großräumigen (auf kpc-Skalen) eingebettet sind. Daher sind Beobachtungen mit hoher Auflösung (unter 1 Bogensekunde) nötig, um die Verteilung und Kinematik des molekularen Gases in der Umgebung von AGN korrekt abzuleiten.

Unsere ersten CO-Aufnahmen von NUGA-Objekten zeigen eine vielfältige Morphologie bei den zirkumnuklearen Scheiben von AGN-Wirtsgalaxien (siehe Abb. III.4.5). Auf verschiedenen räumlichen Skalen wurden unterschiedliche Gravitationsinstabilitäten identifiziert. In einigen Galaxien findet man mehrere nebeneinander bestehende Störungen, während andere hauptsächlich nur einen Instabilitätstyp aufweisen. Die meisten Störungen, die in den Kernscheiben der NUGA-Objekte beobachtet wurden, stehen mit selbstgravitierenden Gasinstabilitäten in Zusammenhang.

Die Vielfalt der Kinematik des Kerngases kann grob wie folgt klassifiziert werden:

- (a) $m = 1$ Instabilitäten, die als einarmige Spiralen oder schräg liegende Scheiben auftreten und sich auf mehrfachen Skalen entwickeln, von etlichen zig bis zu etlichen hundert Parsec.
- (b) $m = 2$ Instabilitäten, welche die typischen zweiar-migen Spiralwellen (die so genannten Zwillingsspitzen) oder Gasbalken entwickeln, von denen man annimmt, dass sie sich in den Potentialen stellarer Balken ausbilden.
- (c) Ringe und stochastische Spiralen, die mit nicht-selbstgravitierenden Instabilitäten zusammenhängen.

Eine Schlüsselfrage, die aus diesen Ergebnissen folgt, lautet, ob die dynamischen Merkmale des Kerns/Zentrums von den Eigenschaften der Wirtsgalaxie abhängen, d.h. ob sich die Eigenschaften der großräumigen Scheiben im Kern widerspiegeln (gleiche Moden wie in der Kernregion). Dies würde darauf hindeuten, dass die Moden im Kern von großräumigen Antriebskräften

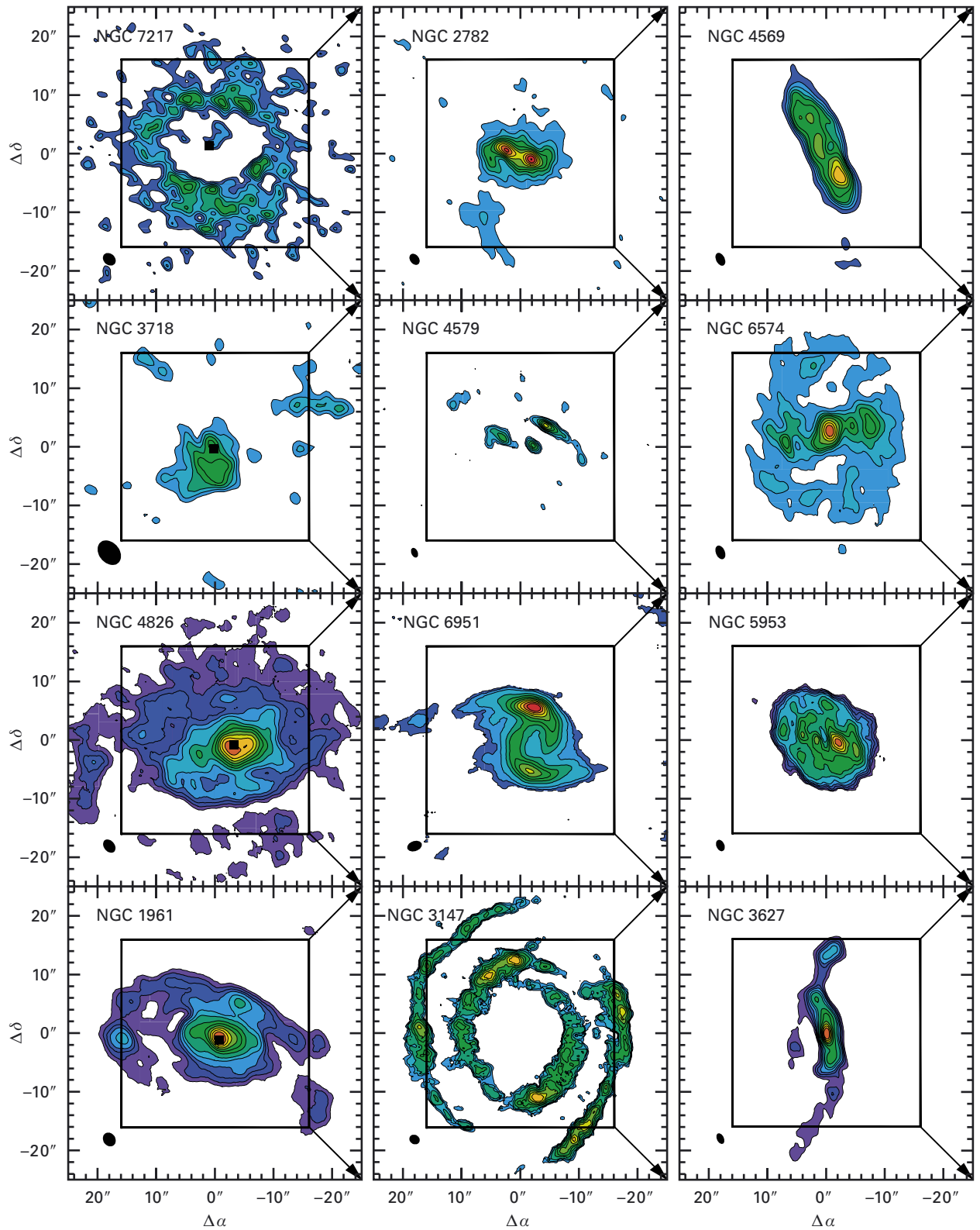


Abb. III.4.5: Beispiele für NUGA-Quellen, beobachtet im Licht ihrer ^{12}CO (1-0)-Linie. Die Verteilung des molekularen Gases in der zentralen Kiloparsec-Region zeigt eine Fülle an dynamischen Erscheinungsformen, von Ringen (z.B. oben links) über $m = 1$ Moden (unten links, z.B. schräg liegende Scheiben oder einarmige Spiralen) bis hin zu $m = 2$ Moden (Mitte,

z.B. zweiarmige Spiralen). Die Größe der Keule (d.h. das Auflösungsvermögen) ist in der linken unteren Ecke in jedem Teilbild angedeutet. Dies zeigt deutlich die Notwendigkeit, hinreichend große Stichproben zu untersuchen, um die vielfältige Kinematik des Gases in Galaxienkernen erfassen zu können.



Abb. III.4.6: Das Very Large Array (VLA) besteht aus 27 Antennen mit je 25 m Durchmesser. Es befindet sich in New Mexico, USA und wird vom National Radio Astronomy Observatory (NRAO) betrieben. Es überdeckt einen Wellenlängenbereich von unter 1 Zentimeter bis zu einigen Metern. Mit Hilfe der Feinstrukturremissionslinie des atomaren Wasserstoffs HI bei 1.4 GHz (21 cm Wellenlänge) kann die Kinematik und Verteilung des atomaren Gases in nahen Galaxien untersucht

werden. HI-Linienemission kann normalerweise bis in die äußersten Randbezirke der Gasscheiben von Spiralgalaxien nachgewiesen werden, die typischerweise größer sind als die optisch sichtbaren Scheiben. Überdies ist Kontinuumsstrahlung bei Radiowellenlängen ein guter Indikator für Sternentstehung, die von Staub verdeckt und daher bei optischen Wellenlängen nicht sichtbar ist. (Mit freundlicher Genehmigung von NRAO)

(wie z.B. Gezeitenwechselwirkungen oder verbogenen HI-Scheiben) und/oder von der gesamten Menge des atomaren Gases und seiner Verteilung abhängen.

Um diese Fragen in Angriff zu nehmen, haben Eva Schinnerer und ein Doktorand am MPIA zusammen mit Kollegen vom NUGA-Projekt und C.G. Mundell (ARI, Liverpool, UK) ein Projekt zur Kartierung der Gaskinematik der äußeren Scheibe mittels Beobachtung der HI-Emission bei 21 cm begonnen. Die Beobachtungen wurden mit dem Very Large Array (VLA) des National Radio Astronomy Observatory (NRAO, siehe Abb. III.4.6) durchgeführt. Die Kartierung der unterschiedlichen räumlichen Skalen der verschiedenen Instabilitäten (HI: äußere, CO: innere) ist unbedingt erforderlich, da sich die Instabilitäten entkoppeln und so ein weiteres Einstürzen verhindern können.

Die vorläufige Auswertung dieser HI-Daten, die bei niedriger Auflösung mit der D-Konfiguration des VLA gewonnen wurden, lässt darauf schließen, dass in unserer NUGA-Stichprobe kleine HI-Begleiter und HI-Scheiben vorherrschen. Dies deutet darauf hin, dass zumindest Gezeitenwechselwirkungen und kleinere Verschmelzungen als mögliche Triebkräfte der Kernaktivität in Frage kämen. Diese noch andauernde systematische Untersuchung der Gaskinematik über Skalen von einigen zig Parsec bis zu den äußeren zig

Kiloparsec wird es uns ermöglichen, die Gasströmung von den Randbezirken der Scheibe bis in die zentrale Kiloparsec-Region zu verfolgen (siehe Abb. III.4.7). Die kombinierten CO- und HI-Daten werden von entscheidender Bedeutung für die Überprüfung gegenwärtiger und zukünftiger dynamischer Modelle sein, die den Gasfluss in Scheibengalaxien beschreiben.

Ein fehlendes Verbindungsglied: Wie Sternentstehung Gasströmungen beeinflusst

Man geht davon aus, dass der Großteil der Sternentstehung in normalen Spiralgalaxien durch Spiraldichtewellen gesteuert wird. Eine genaue Kenntnis der physikalischen Prozesse in Zusammenhang mit Spiraldichtewellen ist daher von grundlegender Bedeutung, um die Entstehung von Sternen in Spiralgalaxien zu verstehen. Die Whirlpool-Galaxie M 51 ist ein ideales Objekt, um Spiralstrukturen zu untersuchen, weil sie in unserer Nähe liegt (9 Mpc Entfernung), deutlich ausgeprägte Spiralarme hat und beinahe direkt in Draufsicht zu sehen ist (Abb. III.4.8). Die etwa 10 Bogensekunden (500 pc) breiten Spiralarme enthalten einen beträchtlichen Anteil des molekularen Gases der Galaxie. Die in M 51 angetroffenen ungewöhnlich hohen Strömungsgeschwindigkeiten

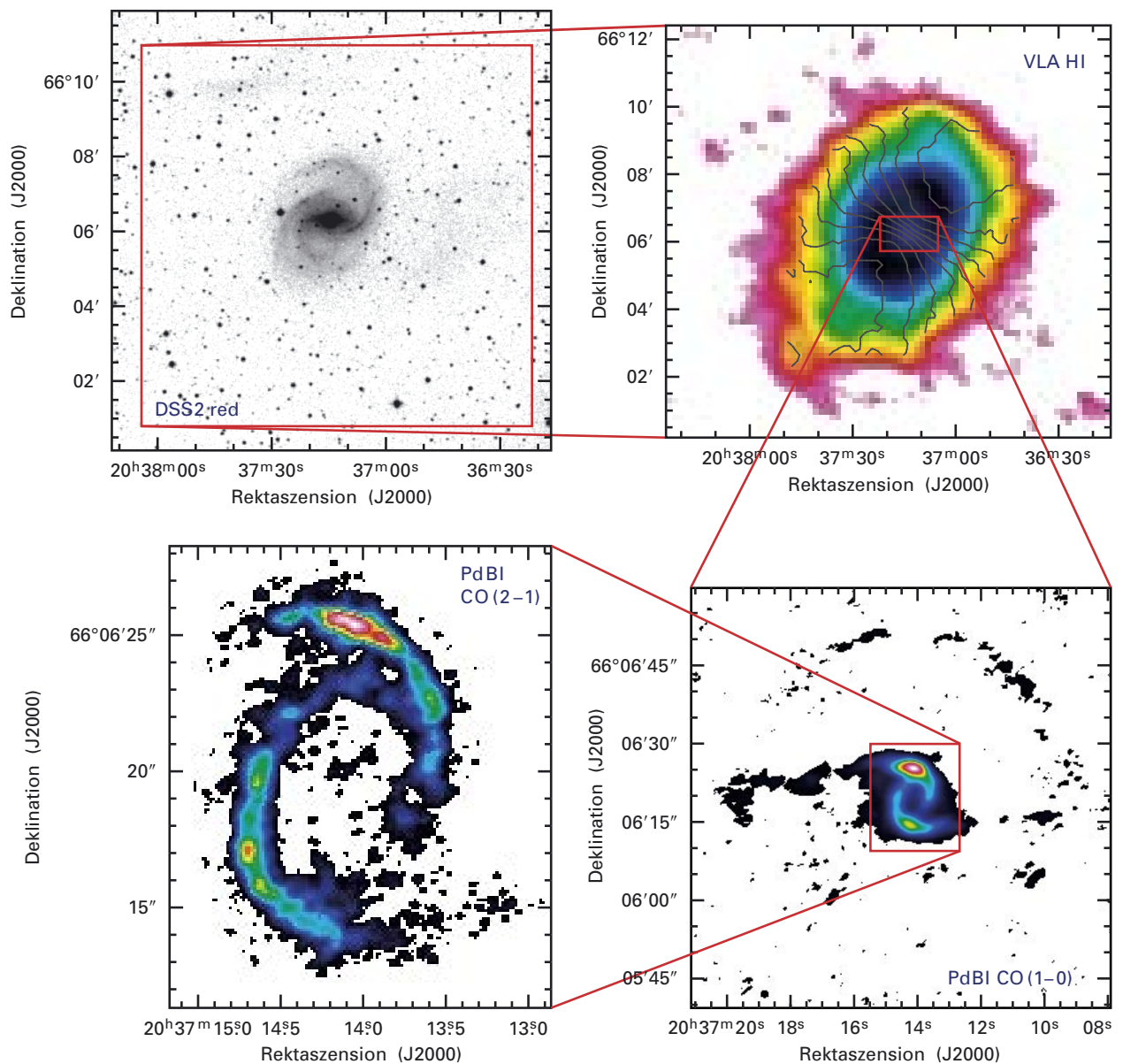
(60 – 150 km/s) lassen auf eine sehr starke Dichtewelle schließen, deren allgemeine Merkmale Geschwindigkeitsdiskontinuitäten und Strömungsbewegungen quer durch die Spiralarme sind. Mit den zahlreichen Riesenmolekülwolkenkomplexen (GMC) ist eine große Anzahl Sternhaufen mit den Spiralarmen verknüpft, wie in hochaufgelösten Daten des Weltraumteleskops HUBBLE erkennbar ist. Nichtsdestoweniger gibt es keine einfache

Korrelation zwischen dem Gasreservoir und der Sternentstehungsrate, was auf eine unterschiedliche Effizienz der Sternentstehung und damit auf veränderliche physikalische Bedingungen in einzelnen GMC hindeutet.

Eine von Wissenschaftlern am MPIA geleitete Kollaboration hat in einer ausgewählten Region der Scheibe von M 51 die Strahlung vieler verschiedener Übergänge des CO-Moleküls gemessen. Die daraus gewonnene In-

Abb. III.4.7: Das Beispiel der NUGA-Quelle NGC 6951 zeigt deutlich, wie wichtig es ist, HI- und CO-Daten zu kombinieren, um die Kinematik des Gases über Skalenlängen mehrerer Größenordnungen hinweg zu erkunden. Die mit dem VLA gewonnenen HI-Daten (*oben rechts*, Intensitätskarte in Farbe, Geschwindigkeitsfeld als Konturen) zeigen deutlich, dass die galaktische Gasscheibe sehr viel ausgedehnter ist als die stellare Scheibe, sichtbar in ihrem optischen Licht aus der DSS2-Rot-Durchmusterung (*oben links*). Die CO(1-0)-

Strahlung, beobachtet mit dem PdBI (*unten rechts*), zeigt Gasbänder entlang des stellaren Balkens und eine Struktur, die einem Kernring ähnelt. Nur die mit dem PdBI mit einer Auflösung von 0.7 Bogensekunden aufgenommenen CO(2-1)-Daten (*unten links*) lösen diesen inneren »Ring« in eine spiralähnliche Struktur und eine geringe Menge Gas dicht am Seyfert-II-Kern auf. Dies zeigt die Leistungsfähigkeit der HI- und CO-Daten der NUGA-Stichprobe bei der Überprüfung dynamischer Modelle.



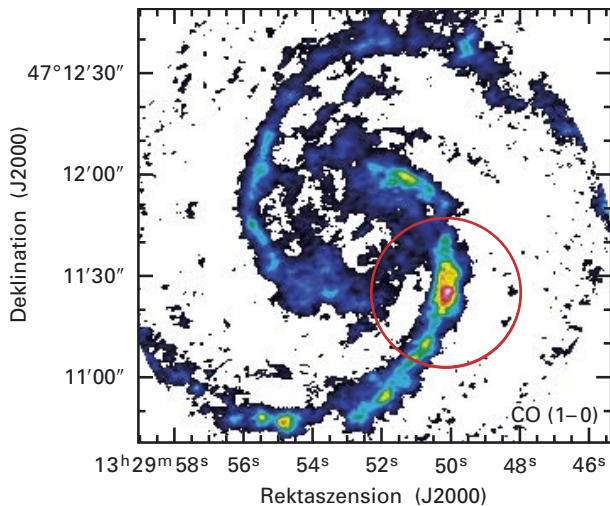
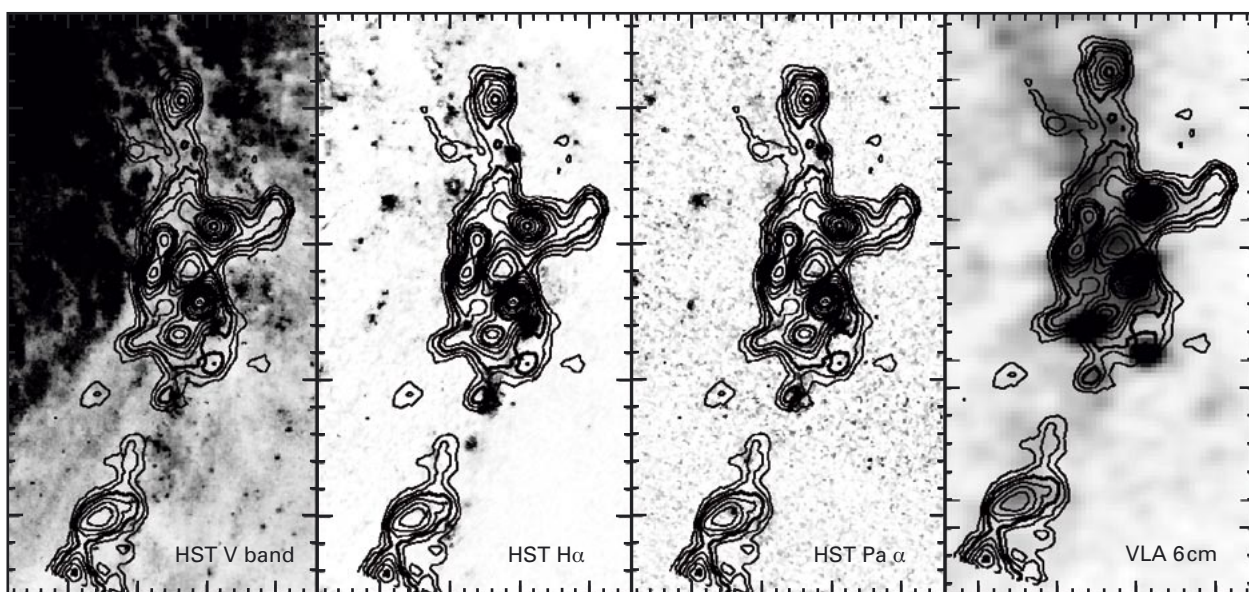


Abb. III.4.8: Karte der Intensität der $^{12}\text{CO}(1-0)$ -Linie, aufgenommen am Owens Valley Radio Observatory (OVRO) mit einer Auflösung von 3 Bogensekunden. Sie zeigt die Verteilung der kalten, molekularen interstellaren Materie in M 51. Die $^{12}\text{CO}(1-0)$ -Linienemission stammt hauptsächlich vom molekularen Gas in den Spiralarmen. Der rote Kreis kennzeichnet das in Abb. III.4.9 gezeigte Gebiet.

Abb. III.4.9: Vergleich der Verteilung verschiedener Indikatoren für Sternentstehung mit der Lage des molekularen Gasarms. Die mit einer Auflösung von 1.5 Bogensekunden aufgenommene Intensitätskarte der $^{12}\text{CO}(2-1)$ -Linie ist in Form von Konturlinien sowohl einer mit dem HST gewonnenen Aufnahme im V-Band (*links*) als auch der mit dem VLA bei einer Wellenlänge von 6 cm aufgenommenen Radiokontinuumstrahlung (*rechts*) überlagert. Die Aufnahmen zeigen entwickelte Sternhaufen (*links*), $\text{H}\alpha$ (Mitte links) und $\text{Pa}\alpha$ -Linienemission (Mitte rechts). Letztere machen durch unterschiedliche Empfindlichkeit (aufgrund interner Extinktion) HII-Regionen sichtbar. Die Radiokontinuumskarte

formation über den physikalischen Zustand des molekularen Gases, wie z.B. seine Dichte und kinetische Temperatur, kombiniert mit der Information, wo sich neu entstehende Sterne, ältere Sternhaufen usw. befinden, ermöglicht uns langsam zu verstehen, wie Sternentstehung die Gasströmung im Einzelnen beeinflussen könnte. Unsere vorläufige Auswertung legt folgendes Bild für die Umgebung in den Spiralarmen von M 51 nahe (Abb. III.4.9): Das molekulare Gas tritt in den Spiralarm ein, wird durch die Stoßwelle der Dichtewelle komprimiert und kühlt sich ab. Der Ort, an dem sich Sterne bilden, kann wegen der hohen Extinktion im Optischen oder nahen Infrarot nicht identifiziert werden (siehe Abb. III.4.3). Unsere Messungen des Radiokontinuums, die mit dem VLA mit einer Auflösung von 3 Bogensekunden durchgeführt wurden, deuten darauf hin, dass Sternentstehung sogar schon im Inneren des aus molekularem Gas bestehenden Arms stattfindet, deutlich vor den im Optischen und nahen Infrarot sichtbaren HII-Regionen. Das Radiokontinuum ist jedoch von Synchrotronstrahlung von Supernova-Überresten überlagert. Zusätzliche Beobachtungen im thermischen Infrarot sind unbedingt nötig, um zu überprüfen, ob tatsächlich eine räumlich aufgelöste Zeitabfolge vorhanden ist (molekulares Gas – eingebettete Sternentstehungs-

(rechts) zeigt junge eingebettete Sternentstehungsgebiete sowie die Orte von Supernova-Überresten. Das molekulare Gas folgt nahezu perfekt den auf der V-Band-Aufnahme des HST erkennbaren Staubbändern. Ein Vergleich der Linienemission aus den HII-Regionen mit der Kontinuumstrahlung bei 6 cm zeigt, dass im Verborgenen eine beträchtliche Sternentstehung im Gange zu sein scheint, die selbst in den mit NICMOS aufgenommenen $\text{Pa}\alpha$ -Daten nicht erkennbar ist. Desgleichen scheint es eine räumliche Verschiebung zwischen den verschiedenen Indikatoren zu geben, die auf eine räumlich aufgelöste Zeitabfolge im Sternentstehungsprozess hinweisen könnte.



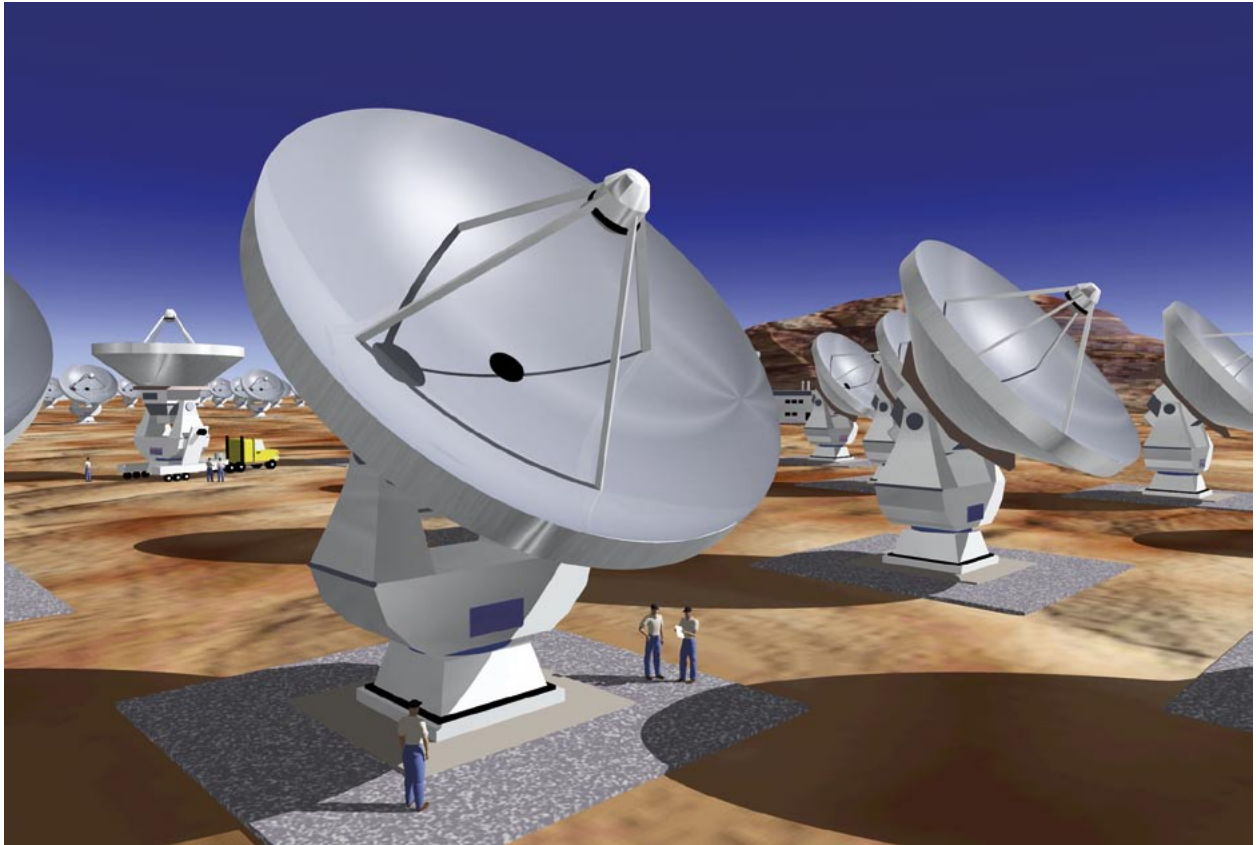


Abb. III.4.10: Künstlerische Darstellung des Atacama Large Millimeter Array (ALMA). Bis zu 64 Antennen mit je 12 Meter Durchmesser werden an dem Standort Chajnantor errichtet werden, einem Hochplateau in etwa 5000 m Höhe mitten in den Chilenischen Anden. (Mit freundlicher Genehmigung der ESO)

gebiete – HII-Regionen – Sternhaufen) und um die physikalischen Bedingungen in dem entstehenden warmen Gas zu bestimmen.

Die Zukunft: ALMA

Das Atacama Large Millimeter Array (ALMA, Abb. III.4.10) wird derzeit gemeinsam von der ESO, Spanien, USA und Kanada in Nordchile errichtet. Dieses neue Millimeter-Interferometer wird nicht nur eine um eine Größenordnung bessere Empfindlichkeit und räumliche Auflösung als heutige Millimeter-Interferometer haben,

sondern es wird auch Beobachtungen hoher Auflösung in Atmosphärenfenstern im Sub-Millimeterbereich ermöglichen, wo die Strahlung höherer Molekülübergänge ausgesandt wird. Deshalb sind Untersuchungen wie NUGA ausschlaggebend für die Erkundung aller relevanten Parameter, um die bestmöglichen Projekte für ALMA zu entwerfen. Zukünftige Beobachtungen mit ALMA werden sicher die höhere Winkelauflösung nutzen. Doch entscheidend für ein besseres Verständnis des Zusammenspiels zwischen Sternentstehung und Gasströmungen sowie des aus vielen Komponenten bestehenden molekularen Gases selbst sind Beobachtungen verschiedener Moleküllinien-Indikatoren, wie sie ALMA ermöglichen wird.

Alle beschriebenen Projekte wie auch andere Programme in Zusammenhang mit dem Radio/Millimeterbereich am MPIA stellen eine ausgezeichnete Vorbereitung auf die zukünftige Arbeit mit ALMA dar.

(Eva Schinnerer)

IV. Instrumentelle Entwicklungen

IV.1 Mehr als Streifen: Das Bildebenen-Interferometer LINC-NIRVANA

LINC-NIRVANA ist ein Bildebenen-Interferometer für den nahen Infrarotbereich mit einer hochentwickelten multikonjugierten Adaptiven Optik (MCAO) für das Large Binocular Telescope. Das LBT ist ein Doppel-8.4-m-Teleskop, das zur Zeit auf dem Mt. Graham im Südosten Arizonas seiner Vollendung entgegen sieht. LINC-NIRVANA wird die von den beiden gewaltigen Spiegeln kommende Strahlung im »Fizeau«-Modus interferometrisch vereinen. Dabei bleibt die Phaseninformation erhalten, und es sind echte Bildaufnahmen mit einem weiten Gesichtsfeld möglich. Das Instrument wird innerhalb eines wissenschaftlich nutzbaren Gesichtsfelds von etwa 10×10 Quadratbogensekunden die Empfindlichkeit eines 12-m-Teleskops und die räumliche Auflösung eines 23-m-Teleskops besitzen. Leitsterne zur Korrektur atmosphärischer Effekte können aus deutlich größeren Feldern ausgewählt werden: bis zu sechs Bogenminuten Durchmesser beim MCAO-System für den sichtbaren Spektralbereich und bis zu einer Bogenminute beim Streifenmusterstabilisator für das nahe Infrarot.

Das LINC-NIRVANA-Interferometer wird gemeinsam von vier Instituten gebaut: dem MPA, Heidelberg, dem Astronomischen Observatorium des INAF in Arcetri, Florenz, der Universität Köln und dem MPI für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn.

Das Large Binocular Telescope

Das LBT ist ein ehrgeiziges, innovatives Unterfangen zum Bau des größten Einzelteleskops der Welt. Das LBT verspricht bahnbrechende Beobachtungen, die zu einem besseren Verständnis des Ursprungs und der Entwicklung unseres Universums und seiner Bestandteile führen werden. Zudem bietet es eine einzigartige Möglichkeit, nach Planeten außerhalb unseres Sonnensystems zu suchen, und es eignet sich hervorragend zum Studium der Stern- und Planetenentstehung. Das LBT-Projekt ist ein Gemeinschaftsunternehmen der University of Arizona, des Deutschen LBTB-Konsortium, der astronomischen Gemeinde Italiens (vertreten durch das Astronomische Observatorium des INAF in Arcetri), der Ohio State University und der Research Corporation in Tucson.

Die Konfiguration des LBT

Abb. IV.1.1 zeigt die Konfiguration des Large Binocular Telescope. Die beiden 8.4 m großen Spiegel befinden sich auf einer einzigen gemeinsamen Montierung. Die Sekundärspiegel bestehen aus dünnen Glasmembranen, deren Form von 672 magnetischen Linearmotor-Aktuatoren in sehr rascher Abfolge korrigiert wird. Diese adaptiven Sekundärspiegel können Verzerrungen beseitigen, die durch atmosphärische Turbulenzen hervorgerufen werden. Um die Fehlerdiagnose bei Tests und einen effizienten Betrieb zu erleichtern, sind die Sekundärspiegel konkav. Das erfordert ein Gregory-System mit einem reellen Primärfokus etwa einen Meter unterhalb der Sekundärspiegel. Aufgrund der lichtstarken $f/1.14$ Primärspiegel hat das Teleskop eine geringe Gesamtlänge, was die Größe und damit die Kosten der Kuppel reduziert.

Da seine beiden Spiegel auf einer gemeinsamen Montierung sitzen, kann das LBT in drei Modi betrieben werden:

- Als zwei 8.4-m-Teleskope mit getrennten Fokalebene und Instrumenten. Die Montierung erlaubt eine Ausrichtung der Teleskope auf Felder, die 1 bis 2 Bogenminuten auseinander liegen; Multi-Objekt-Instrumente können entweder die effektive Integrationszeit oder die Anzahl der beobachteten Objekte verdoppeln.
- Als 12-m-Teleskop, wobei das von beiden Spiegeln kommende Licht inkohärent in einer einzigen Fokalebene vereint wird. In der Praxis ist dieser Modus nicht besonders nützlich, da die Leistung gewöhnlich durch Hintergrundlicht beschränkt ist. Unter solchen Umständen können identische, auf jedem einzelnen Teleskop montierte Instrumente das gleiche Ergebnis mit einer einfacheren, robusteren Konstruktion erzielen.
- Als Interferometer, wobei das von beiden Spiegeln kommende Licht phasengleich (d.h. kohärent) vereint wird. Dies ist der Modus, den LINC-NIRVANA verwendet wird.

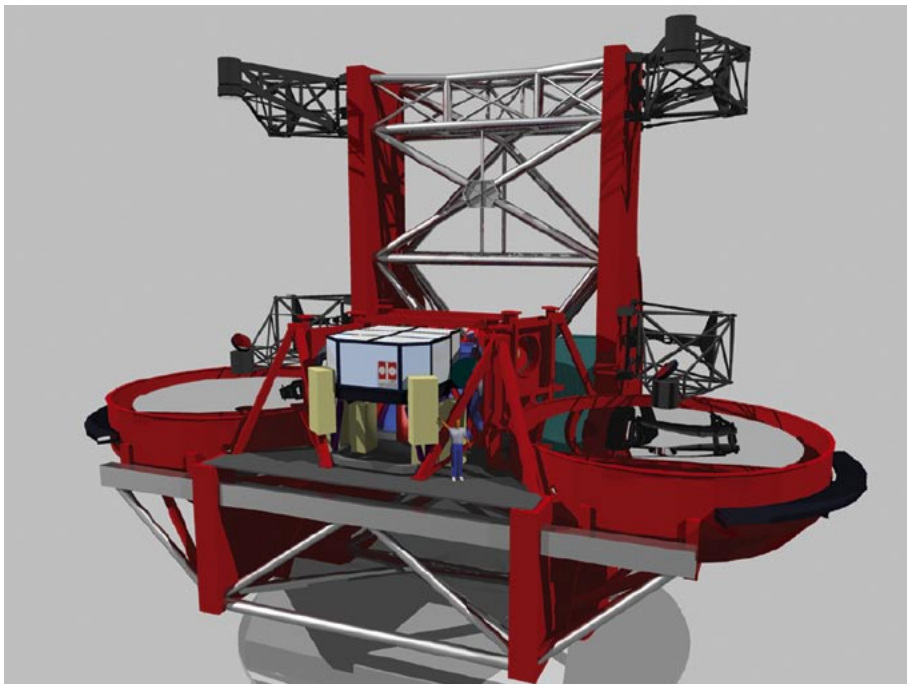
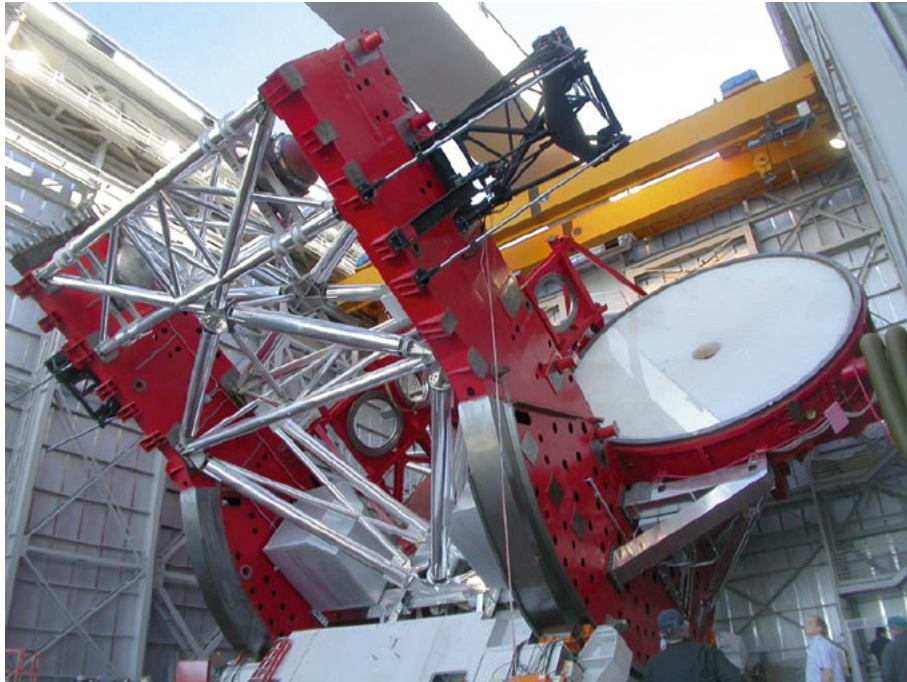
Das LBT unterstützt insgesamt zwölf Fokus-Stationen: zwei Primärfoki, zwei »direkte« Gregory-Foki unterhalb der Hauptspiegel, zwei über Glasfasern gespeiste Hilfsfoki und sechs »geknickte« Gregory-Foki auf der zentralen Instrumentenplattform. Die beiden Interferometer LBTI und LINC-NIRVANA werden zwei Paare dieser sechs zentralen Fokus-Stationen belegen. Rekonfi-

gurierbare Schwenkarme (siehe Abb. IV.1.1) ermöglichen ein rasches Austauschen von Instrumenten, wenn dies durch unterschiedliche wissenschaftliche Anforderungen oder wechselnde Beobachtungsbedingungen nötig ist.

Abb. IV.1.1: a) Das LBT im September 2004. b) LINC-NIRVANA auf der zentralen Instrumentenplattform (hellgrauer Kasten). Zum Größenvergleich beachte man die menschliche Figur.

LBT – Stand und Zeitplan

Zum jetzigen Zeitpunkt (März 2005) ist vorgesehen, dass das Large Binocular Telescope sein »Erstes Licht«, definiert als Bildaufnahmen im Primärfokus mit einem einzelnen Hauptspiegel, Ende Sommer 2005 sieht. Im Sommer 2006 soll der erste der beiden adaptiven Sekundärspiegel installiert und getestet werden, sodass das erste der Gregory-Fokus-Instrumente in Betrieb genommen werden kann.



Der zweite Hauptspiegel wird gegen Ende 2005 eintreffen; sein adaptiver Sekundärspiegel folgt kurz nach dem ersten im Sommer 2006. Das »Zweite Licht«, definiert als Betrieb im inkohärenten Doppelteleskop-Modus, ist im Jahr 2007 geplant.

Der Betrieb des Large Binocular Telescope als einzelnes kohärentes Teleskop wird eine zusätzliche Hardware- und Software-Infrastruktur sowie eine ausführliche Inbetriebnahme- und Erprobungsphase erfordern. Wir erwarten, dass die letzte Betriebsphase des LBT, die so genannte »kohärente Vereinigung«, nach Mitte 2007 beginnen wird. In den Zeitraum zwischen Zweitem Licht und kohärenter Vereinigung fällt auch die Inbetriebnahme des Großteils der Instrumente, die neben dem Teleskop, den adaptiven Spiegeln, Leitsystemen und Teleskopsoftware ebenfalls zur LBT-Einrichtung gehören.

Fizeau-Interferometrie am LBT

LINC-NIRVANA vereint die von den beiden 8.4-Meter-Hauptspiegeln des LBT kommende Strahlung im Fizeau-Modus. Fizeau-Interferometrie bietet mehrere Vorteile gegenüber anderen Konfigurationen, insbesondere wenn das wissenschaftliche Programm echte Weitfeld-Aufnahmen hoher Empfindlichkeit von komplexen Quellen erfordert. Durch die Strahlvereinigung nach Fizeau werden dem Teleskop und dem optischem System einige Einschränkungen auferlegt, doch die Konstruktion des LBT ist hervorragend geeignet, diese Einschränkungen auszugleichen.

Fig. IV.1.2: Die LINC-NIRVANA Point Spread Function und das simulierte Bild einer Galaxie.

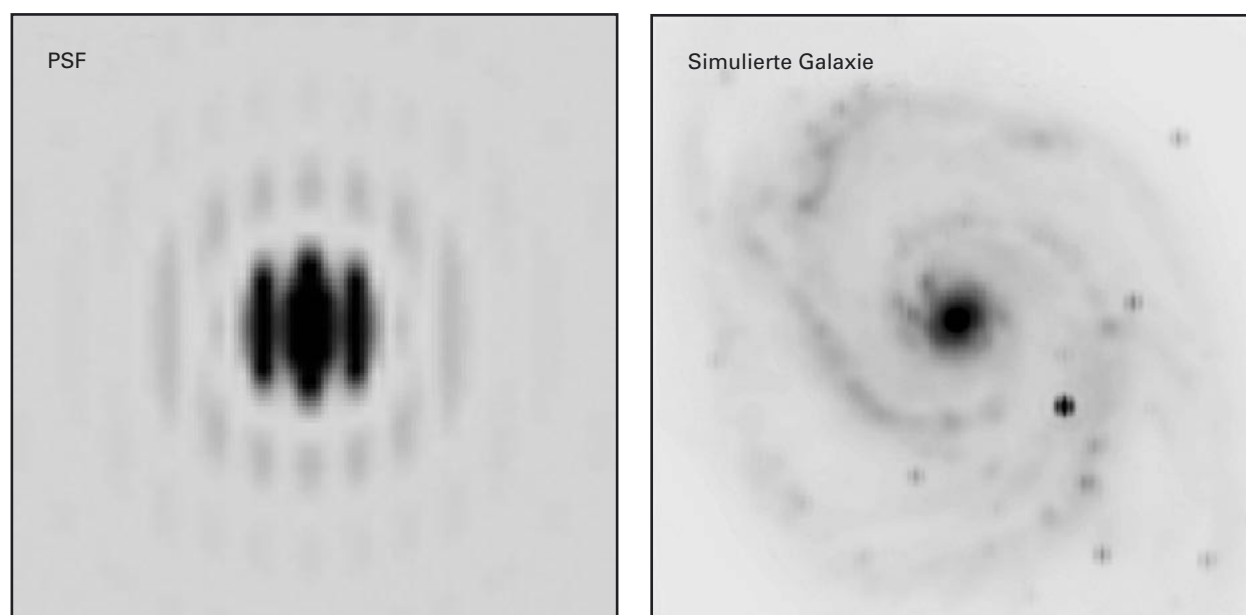
Koaxiale gegen Fizeau-Interferometrie

Im Wesentlichen haben alle heutigen bodengebundenen Interferometer eine koaxiale oder Pupillenebenen-Konfiguration, bei der der Strahlvereiniger die zwei (oder mehr) Teleskoppupillen überlagert und beim Durchstimmen einer kurzen Verzögerungsstrecke (engl. delay line) ein moduliertes Signal produziert, bei dem die beiden Lichtwege immer wieder eine konstruktive Interferenz (verschwindende optische Wegdifferenz) durchlaufen.

Obwohl weit verbreitet im Einsatz, leidet die Amplituden-Interferometrie unter einer Reihe von Nachteilen. Zum Beispiel erzeugt sie in ihrer einfachsten Ausführung keine Bilder. Zudem kann sehr viel Beobachtungszeit nötig sein, um komplexe Quellen zu verstehen. Das Gesichtsfeld ist bei der Pupillenebenen-Konfiguration ebenfalls merklich eingeschränkt.

Die Fizeau- oder Bildebenen-Konfiguration überwindet diese Beschränkungen. In einem Fizeau-Interferometer interferieren die Wellenfronten in der Fokalebene und nicht in der Pupillenebene. Im Gegensatz zu ihren Pupillenebenen-Vettern können Fizeau-Interferometer echte Bilder erzeugen. Tatsächlich kann das Gesichtsfeld mehrere Bogenminuten groß sein – es ist allein durch die Fähigkeit des adaptiven Optiksystems begrenzt, aberrationsfreie Wellenfronten über große Winkel am Himmel zu liefern. Am einfachsten kann man sich vielleicht ein Fizeau-Interferometer als ein sehr großes Teleskop vorstellen (beim LBT mit 23 m Durchmesser), das jedoch mit einer Maske abgedeckt ist, die der Konfiguration der vor ihm befindlichen Einzelteleskope entspricht. Das so entstehende Bild einer Punktquelle (Punktbild, engl. Point Spread Function PSF), ist in Abb. IV.1.2 zu sehen.

Es gibt eine Reihe zwingender Gründe, Bildebenen-Interferometrie am Large Binocular Telescope energisch weiterzuverfolgen:



1. Die Fizeau-Interferometrie liefert eine hohe Winkelauflösung über ein großes Gesichtsfeld, dies allerdings nur unter bestimmten geometrischen Bedingungen für den Strahlengang. Um diese Geometrie erzielen zu können, ist für gewöhnlich eine schwerfällige Zwischenoptik nötig. Am Large Binocular Telescope jedoch teilen sich die beiden Spiegel eine gemeinsame, steuerbare Montierung. Das bedeutet, dass das Teleskop dem Zielobjekt stets dieselbe Teleskopkonfiguration darbietet, was die Aufgabe, die benötigte optische Geometrie aufrechtzuerhalten, erheblich vereinfacht. Diese Vereinfachung setzt sich direkt in Kostenersparnissen und eine erhöhte Empfindlichkeit um. Bei Infrarotbeobachtungen werden zudem nur drei (statt der sonst üblichen 20) warme Spiegel benötigt, um die Strahlung zum Strahlvereiniger zu lenken.
2. Fizeau-Bildinterferometrie funktioniert am besten mit kompakten Teleskopanordnungen, das heißt mit Konfigurationen, bei denen der Abstand der Spiegel zueinander vergleichbar mit ihrem Durchmesser ist. Dies gewährleistet eine relativ gleichmäßige Überdeckung aller räumlichen Skalen, sodass es keine Probleme im Zusammenhang mit der »Überauflösung« (d.h. dem Unsichtbarwerden) von Strukturen gibt, deren Ausdehnung zwischen der dem Durchmesser d des Einzelspiegels entsprechenden Größe und der gesamten Größe (oder Basislänge) B liegt. So hat zum Beispiel ein Interferometer, das aus zwei 10-m-Teleskopen im Abstand von 100 m besteht und bei einer Wellenlänge von 2 μm arbeitet, Probleme, Strukturen bei räumlichen Skalen zwischen 5 Millibogensekunden (λ/B) und 50 Millibogensekunden (λ/d) zu erkennen. Das LBT mit seinen 8.4 m großen Hauptspiegeln im Abstand von 6 m hat keinen solchen blinden Fleck.
3. Es gibt auch strategische Gründe, sich auf Bildbenen-Interferometrie am LBT zu konzentrieren. So stellt sie eine potentiell bedeutsame Technologie für zukünftige boden- und weltraumgestützte Teleskope dar und bietet verglichen mit gegenwärtigen Einrichtungen eine Verdoppelung der Teleskopsammelfläche und der räumlichen Auflösung. Fast alle Partner im LBT-Konsortium, insbesondere das MPIA, haben bereits Zugang zu Teleskopen der 8-m-Klasse und modernster Instrumentierung. Indem wir uns auf die einzigartigen Aspekte des LBT konzentrieren, insbesondere auf die Interferometrie, werden wir in der Lage sein, diese konkurrierenden Einrichtungen zu übertreffen.
4. Schließlich, und das ist das Wichtigste, wird uns die Fizeau-Interferometrie am LBT sehr viel bessere und neuartige wissenschaftliche Beobachtungen ermöglichen. Insbesondere können wir mit Hilfe der Fizeau-Interferometrie unsere wertvollen Spiegel auf eine Weise nutzen, bei der Empfindlichkeit, räumliche Auflösung und Gesichtsfeld erhalten bleiben.

Das LINC-NIRVANA-Instrument

LINC-NIRVANA nahm seinen Anfang als zwei vom MPIA und italienischen LBT-Partnern getrennt vorgeschlagene Projekte. Die ursprünglichen Entwürfe verlangten eine Strahlvereinigung mit relativ kleinem Gesichtsfeld unter Verwendung des normalen adaptiven Optiksystems der Einrichtung. 2001 legte man die beiden Projekte zusammen, und schon bald danach erkannte das Team, dass mit Hilfe der adaptiven Sekundärspiegel des LBT und ein oder zwei zusätzlichen deformierbaren Spiegeln eine multikonjugierte adaptive Optik möglich wäre. MCAO vergrößert nicht nur das verfügbare Gesichtsfeld sondern erlaubt auch die Verwendung sehr viel schwächerer einzelner Leitsterne, was zu einer deutlichen Erweiterung des beobachtbaren Himmelsausschnitts führt.

Seit 2001 hat das Team den Konstruktionsentwurf des Instruments ständig verbessert und eine Reihe von Experimenten zur Konzeptüberprüfung sowie Prototypen entwickelt. Im Jahr 2002 schloss sich die Universität Köln dem Projekt an mit dem Ziel, die Hardware für den Streifenmusterstabilisator und den Kryostaten für den Wissenschaftskanal zu liefern. Ab 2003 brachte das MPI für Radioastronomie in Bonn seine Erfahrung bei der Bildentfaltung sowie beim Betrieb von schnellen, rauscharmen Infrarotdetektoren in das Konsortium ein. Im Berichtsjahr selbst stießen noch kleine Gruppen aus Rom und Genua zum LINC-NIRVANA-Team, die an der optischen Sucherkamera bzw. der Bildverarbeitung mitarbeiten.

Den ersten wichtigen Meilenstein passierte das Projekt im April 2003 mit dem erfolgreichen Abschluss des »Preliminary Design Review« (Vorläufige Konstruktionsüberprüfung). Das »Final Design Review« ist für den Frühsommer 2005 angesetzt.

Astronomische Leistungsmerkmale

Räumliche Auflösung: Das Punktbild von LINC-NIRVANA wird eine Fläche haben, die 400-mal kleiner ist als gute, durch das Seeing begrenzte Bilder, 100-mal kleiner als das Punktbild des HUBBLE-Weltraumteleskops und 10–15-mal kleiner als das des James-Webb-Weltraumteleskops (JWST) oder eines 8-m-Teleskops mit adaptiver Optik. Eine solcher Sprung im Auflösungsvermögen geht direkt einher mit einem besseren Verständnis des Universums. So zeigt zum Beispiel Abb. IV.1.3, wie sich diese höhere Auflösung auf die beobachtbare Morphologie weit entfernter Objekte auswirkt.

Bei Beobachtungen, die durch statistisches Hintergrundrauschen beschränkt sind, führt eine Verringerung der Größe des Punktbildes direkt zu einer Steigerung der Empfindlichkeit. In Tabelle IV.1.1 ist angenommen, dass die Energie der Punktquelle über das ganze Punktbild des Einzelteleskops verteilt ist und herkömmliche Bildverarbeitung angewendet wird. Das LINC-NIRVANA-Team

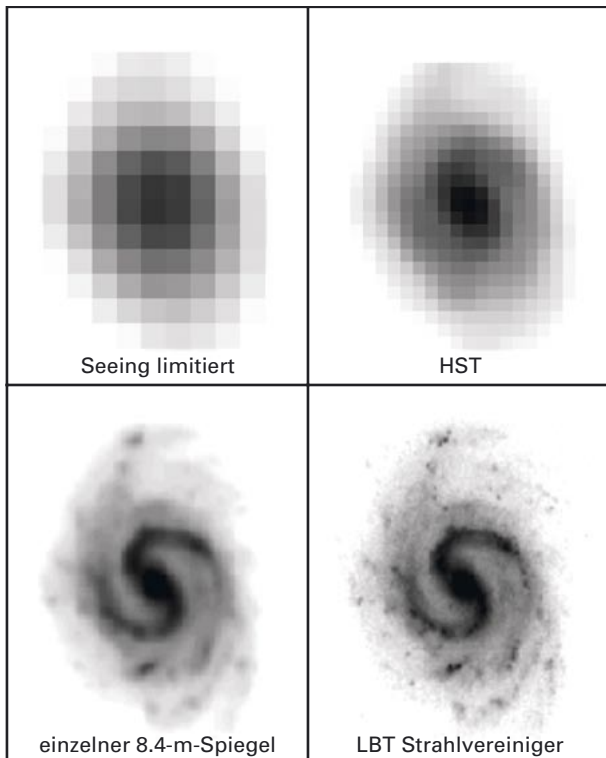


Abb. IV.1.3: Abhängigkeit der Galaxienmorphologie von der Auflösung. Dies ist eine Aufnahme der nahegelegenen Spiralgalaxie NGC 4535, »hinausgeschoben« in eine Rotverschiebung von $z \sim 1$ und dann dargestellt bei seeing-begrenzter Auflösung (0.4 Bogensekunden), der Beugungsgrenze des HUBBLE-Weltraumteleskops (0.2 Bogensekunden), der Beugungsgrenze eines LBT-Spiegels (0.06 Bogensekunden) und der Auflösung von LINC-NIRVANA (0.02 Bogensekunden).

untersucht momentan optimale Extraktionsmethoden zur möglichen Verbesserung der Punktquellenempfindlichkeit, indem nur jene Teile des Punktbildes verwendet werden, die Photonen aus der Quelle enthalten.

Der Nachweis diffuser Emission ist seit jeher ein Schwachpunkt abbildender Interferometer gewesen, da die Zeit, die nötig ist, ein bestimmtes Signal/Rausch-Verhältnis für das Zielobjekt zu erhalten, mit der vierten Potenz des Verhältnisses von Teleskopabstand zu Durchmesser ansteigt. In dieser Hinsicht hat LINC-NIRVANA einen deutlichen Vorteil gegenüber anderen, weniger kompakten Interferometeranordnungen wie zum Beispiel dem Very Large Telescope Interferometer und dem Keck-Interferometer. Die Erfahrung hat auch gezeigt, dass viele »diffuse« Objekte bei verbesserter räumlicher Auflösung in Punktquellen aufbrechen, für die Interferometer die idealen Beobachtungsinstrumente sind (siehe z.B. Abb. IV.1.3).

Das vielleicht Bemerkenswerteste an den Leistungsmerkmalen in dieser Tabelle ist, dass sie konventionelle astronomische Ziele darstellen, auf eine höhere Stufe angehoben mit Hilfe der Interferometrie: Die Vergrößerung

Band	Wellenlänge (μm)	Winkelauflösung (")	Gesichtsfeld ^a (")	Empfindlichkeit ^b
J	1.25	0.011	10.5×10.5	28.0
H	1.65	0.015	10.5×10.5	26.6
K'	2.12	0.020	10.5×10.5	26.0

Tabelle IV.1.1: Räumliche Auflösung, Gesichtsfeld und Punktquellenempfindlichkeit für LINC-NIRVANA

^a Das Gesichtsfeld ist durch die Größe der käuflich erhältlichen Infrarotdetektoren begrenzt und könnte im Prinzip erweitert werden.

^b Punktquellennachweis mit einem Signal/Rausch-Verhältnis von 5 in einer Stunde unter der Annahme einer typischen Nachthimmelshelligkeit.

der Empfindlichkeit, der räumlichen Auflösung und des Gesichtsfelds stünden auf der Wunschliste jedes Astronomen für zukünftige Teleskope und Instrumente. Es ist das zentrale Ziel des LINC-NIRVANA-Projekts, wissenschaftliche Untersuchungen zu ermöglichen und zu verbessern, wie sie die Astronomen gerne durchführen würden.

Übersicht über das Wissenschaftsprogramm

Wie oben betont, wird LINC-NIRVANA zu einer Verbesserung der Beobachtungsmöglichkeiten führen, an denen Astronomen am MPIA zur Zeit interessiert sind. Dabei reichen die Beobachtungsziele von den Oberflächen naher Planeten und Monde bis zu den Kernen von Sternentstehungsgebieten, und weiter bis zu dem schwachen Glimmen der Strahlung vom Rand des sichtbaren Universums. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über das wissenschaftliche Programm von LINC-NIRVANA.

Bildaufnahmen von Planetenoberflächen und Atmosphären: Bei Zielobjekten innerhalb des Sonnensystems werden das große Gesichtsfeld, die hohe räumliche Auflösung und die erhöhte Empfindlichkeit von LINC-NIRVANA Untersuchungen vom Boden aus ermöglichen, die Beobachtungen durch Raumfahrzeuge gleichkommen. Der jüngste Erfolg bei Aufnahmen von der Atmosphäre und der Oberfläche des größten Saturnmondes Titan liefert ein ideales Beispiel und einen Vorgeschmack auf das, was noch folgen wird (siehe Abb. IV.1.4). LINC-NIRVANA wird einen weiteren Sprung vorwärts in der räumlichen Auflösung ermöglichen und die Oberfläche des Titan mit ungefähr zehnmal mehr Pixeln darstellen als diese eindrucksvollen VLT-Bilder.

Extrasolare Planeten: Gegenwärtige Strategien bei der Suche nach Planeten um andere Sterne konzentrieren sich entweder auf die Dopplerverschiebungen stellarer Spektrallinien, hervorgerufen durch die von unsichtbaren Planeten ausgelösten Bewegungen der Sterne, oder

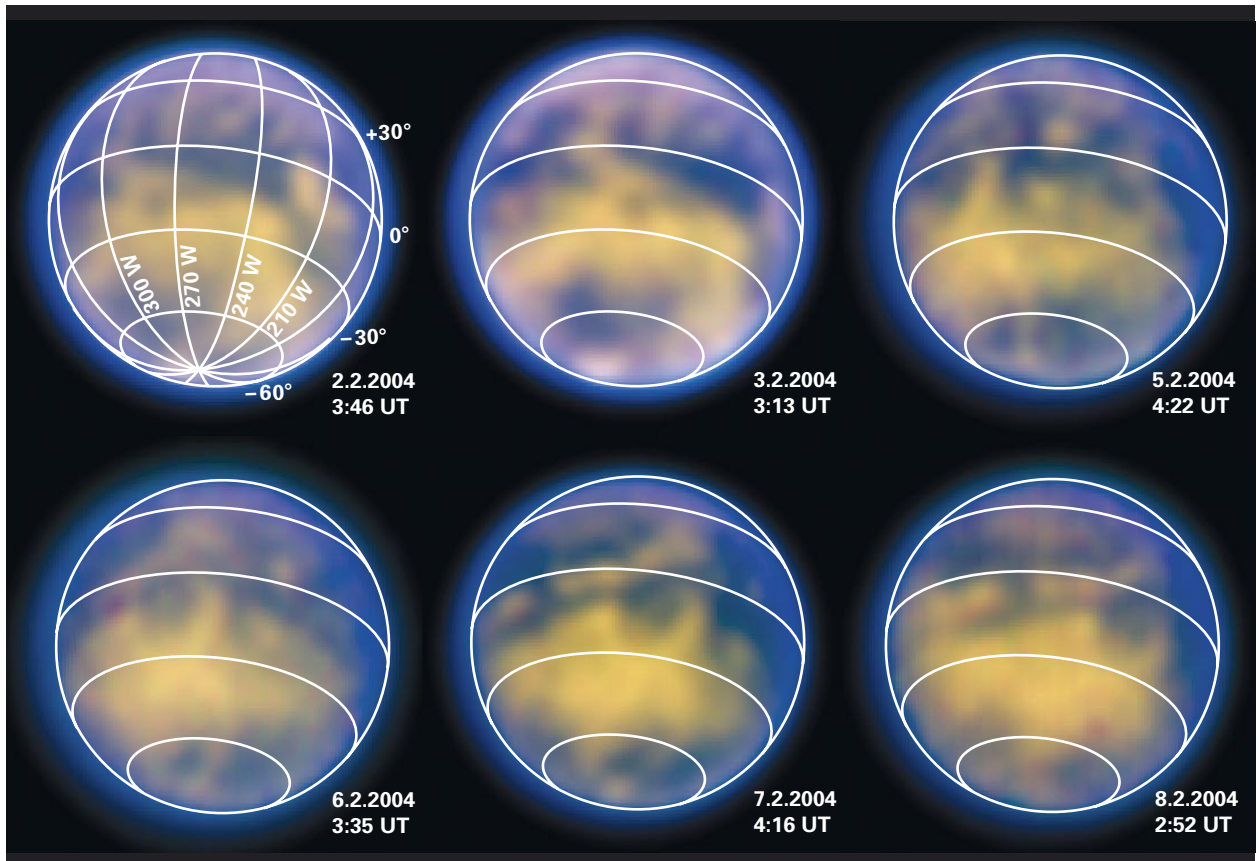


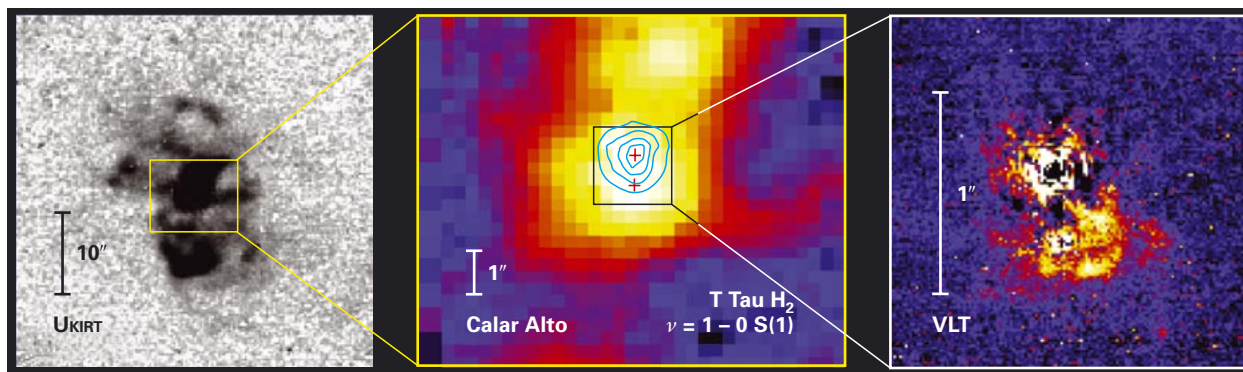
Abb. IV.1.4: Aufnahmen von der Oberfläche des Saturnmondes Titan, gewonnen mit Hilfe herkömmlicher adaptiver Optik an einem 8-m-Teleskop (unter Verwendung von NACO, einem weiteren am MPIA gebauten Instrument). LINC-NIRVANA wird Aufnahmen derartiger Objekte mit etwa zehnmal mehr Bildauflösungselementen über die Oberfläche ermöglichen.

auf die (merklich selteneren) photometrischen Veränderungen, die auftreten, wenn der Planet vor dem Stern vorüber zieht. Mit beiden Methoden werden bevorzugt massereichere (jupiterähnliche) Objekte nahe am Mutterstern nachgewiesen: Die meisten der rund 130 bisher entdeckten »heißen Jupiter« haben deutlich engere Umlaufbahnen als die Erde. Wir planen, mit Hilfe von LINC-NIRVANA und einer sehr »altmodischen« Methode nach Planeten zu suchen: die Messung der Schwankungen, die der Planet durch seine Gravitationswirkung der Bahn seines Muttersterns aufzwingt, während sich beide langsam über den Himmel bewegen.

Die durch LINC-NIRVANA ermöglichte astrometrische Genauigkeit sollte ausreichen, die von Jupiter bei unserer Sonne bewirkten Bahnschwankungen noch aus 300 Lichtjahren Entfernung nachzuweisen. Das große Gesichtsfeld erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass sich mehrere Referenzsterne darin befinden, was die Genauigkeit der relativen Astrometrie erhöht. Entstehungstheorien sagen auch vorher, dass es zahlreiche isolierte Pla-

neten geben könnte, die entweder allein entstanden oder aus Doppel- oder Vielfachsystemen ausgestoßen worden sind. Die Suche nach frei fliegenden Planeten ist ein ideales Projekt für die erhöhte Empfindlichkeit und das große Gesichtsfeld von LINC-NIRVANA.

Energiegleichgewicht in stellaren Kinderstuben: Aufgrund ihrer Wechselwirkung mit zirkumstellaren Scheiben und dem umgebenden Medium spielen Sternwinde eine zentrale Rolle als Katalysator und Regulator des Sternentstehungsprozesses. Leider schränken die kleinen Winkelskalen und das Vorhandensein von verdunkelndem Staub unsere Möglichkeit, die Regionen zu untersuchen, in denen diese wichtigen Wechselwirkungen stattfinden, erheblich ein. LINC-NIRVANA wird uns die beispiellose Möglichkeit bieten, diese grundlegenden Prozesse auf Winkelskalen zu beobachten, die in den nächstgelegenen Sternentstehungsgebieten weniger als einer Astronomischen Einheit (AE) entsprechen. Die Fähigkeit, echte Bilder zu produzieren, ist bei der Entwirrung dieser komplexen Regionen von entscheidender Bedeutung. Ein Überwachungsprogramm der zirkumstellaren Emission, gekoppelt mit hochauflösender Spektroskopie, kann die vollständigen, dreidimensionalen Bewegungen des Gases in der unmittelbaren Sternumgebung aufzeigen. Man bedenke, dass eine sich mit 25 km/s ausbreitende Stoßfront in Taurus schon während einer einzigen einwöchigen Beobachtungsreihe merklich voran kommt.



Vielfachsterne: Die Mehrzahl der Sterne unserer Galaxis sind Mitglieder von Doppel- oder Mehrfachsystemen. Die Verteilung der Abstände der Doppelsternkomponenten hat ihr Maximum bei ca. 50 AE, was in der Entfernung des nächstgelegenen Sternentstehungsgebietes 0.3 Bogensekunden entspricht. Da LINC-NIRVANA im nahen Infrarot arbeitet, kann es den Staub in Molekülwolken durchdringen und junge Doppelsterne mit etwa einem Dreißigstel dieses Abstands trennen. Noch wichtiger ist vielleicht, dass aufgrund der hervorragenden Genauigkeit, die durch relative Astrometrie in einem großen Gesichtsfeld erzielt wird, für eine große Stichprobe an Doppelsternen die Bahnen vermessen werden können. Mit den daraus abgeleiteten dynamischen Massen kann man dann die Masse-Leuchtkraft-Beziehung und die Entwicklungssequenz von Sternen direkt eichen.

Die Struktur zirkumstellarer Scheiben: Wie zuvor schon erwähnt, haben zirkumstellare Scheiben einen großen Einfluss auf den Kollaps von Molekülwolken, indem sie Sternwinde entweder erzeugen oder regulieren. Scheiben sind auch bei der Bildung von Planeten von entscheidender Bedeutung, da sie sowohl als Quelle für das Rohmaterial als auch als schützende Hülle dienen, in der sich das Gas und die hitzebeständigen Elemente zusammenballen und am Ende einen Planeten bilden können. Durch Akkretion und Resonanzstreuung räumt der Planet schließlich eine Lücke in der Scheibe frei und verändert damit unweigerlich deren Struktur und Dynamik. LINC-NIRVANA kann nach Anzeichen für diese Prozesse in gestreutem Licht suchen. Dies ist ein weiteres Beispiel, wo echte Aufnahmen einen enormen Vorzug darstellen. Man geht davon aus, dass sich zirkumstellare Scheiben mit zunehmenden Alter während des Übergangs von der protostellaren in die protoplanetare Phase abflachen, ein Vorgang, den wir mit einer großen Durchmusterung zu verfolgen hoffen.

Supernova-Kosmologie: Unsere Vorstellung von Gestalt und Inhalt unseres Universums hat sich in den letzten Jahren durch die Ergebnisse kosmologischer Untersuchungen anhand von Supernovae mittlerer Rotverschiebung radikal verändert. Die Methode nutzt die Tatsache, dass Supernovae vom Typ I eine intrinsische Leuchtkraft

Abb. IV.1.5: Sternentstehung ist auf allen Winkelskalen ein komplexer Prozess. Diese Bildfolge zoomt in den Kern von T Tau, dem Prototyp eines jungen Sterns. Mit Hilfe von LINC-NIRVANA werden wir letztendlich in der Lage sein, die Geheimnisse der Stern- und Planetenentstehung auf Skalen zu enthüllen, die dem Erdbahndurchmesser entsprechen.

haben, die anhand der zeitlichen Entwicklung ihrer Helligkeit bestimmt werden kann. Daher liefern Messungen dieser Entwicklung und der spektroskopischen Rotverschiebung die Entfernung, die einer gegebenen Rotverschiebung entspricht. Damit kann die Geometrie des Universums vermessen werden. Doch leider sind mit derartigen Beobachtungen bei den mittleren Rotverschiebungen, die mit der heutigen Teleskopgeneration erreichbar sind, die fundamentalen Parameter des Universums nicht unabhängig voneinander messbar. Beobachtungen von schwächeren, weiter entfernten Supernovae können jedoch die Entartung der kosmologischen Parameter brechen. LINC-NIRVANA am LBT hat eine ausreichend hohe Empfindlichkeit, um diese Objekte nachweisen und messen zu können. Ein speziell hierauf ausgerichtetes Programm, das 25 Teleskopnächte beanspruchen würde, sollte in der Lage sein, diese wichtigen kosmologischen Parameter unabhängig voneinander auf 5 Prozent genau zu bestimmen.

Entstehung von Galaxien: Die beste Methode zu verstehen, wie Galaxien entstehen, ist, mit Hilfe des enormen Lichtsammelvermögens großer Teleskope in die Vergangenheit zurück zu blicken, in die Epoche des Galaxienaufbaus. Heutige Modelle behaupten, dass die frühesten Galaxienfragmente klein und lichtschwach sind. Leider zwingt uns die begrenzte Empfindlichkeit heutiger Instrumente dazu, vorzugsweise atypische, leuchtstarke und massereiche Galaxien, sowie Galaxien, die gerade eine Episode stark erhöhter Sternentstehungsaktivität durchmachen, zu untersuchen (Abb. IV.1.6). Eine tiefe Vielfarbanddurchmusterung im nahen Infrarot mit LINC-NIRVANA könnte im Rahmen eines speziellen Programms innerhalb von 20 Nächten eine Stichprobe eines repräsentativen Volumenelements des Universums liefern und dabei Galaxienfragmente aufspüren, deren



Abb. IV.1.6: Die derzeit bestmöglichen Bilder, wie zum Beispiel das »Ultra-Deep Field« des HUBBLE-Weltraumteleskops, können den Galaxienaufbauprozess bis zurück in eine Epoche etwa 1 Milliarde Jahre nach dem Urknall aufdecken. Die weiter zurück liegende und wichtigere Ära der Galaxienentstehung ist nur erreichbar mit Instrumenten wie LINC-NIRVANA, die im Nahinfrarotbereich arbeiten.

Masse nur ein Tausendstel der Masse unseres Milchstraßensystems beträgt. Bis zum Beginn der James-Webb-Weltraumteleskop-Mission wird keine andere Einrichtung diese Kombination aus Empfindlichkeit, Flächenabdeckung und Anzahl nachgewiesener Objekte erreichen können.

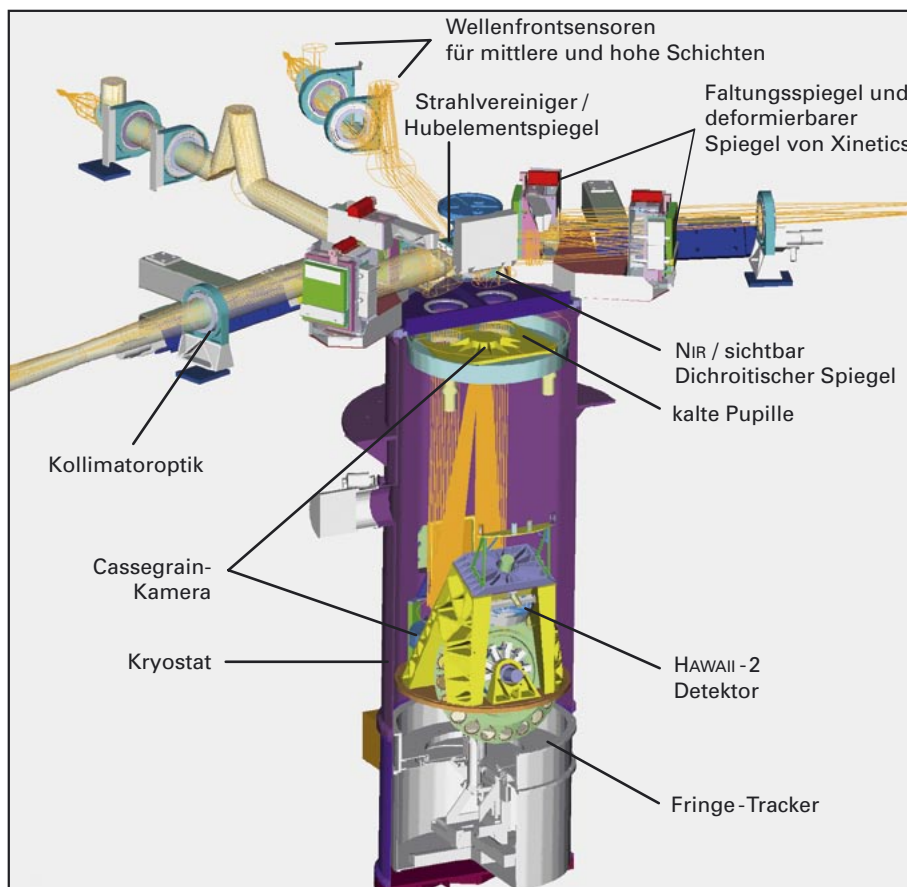
Aufgelöste extragalaktische Sternpopulationen: Die derzeitige Technologie beschränkt unsere Fähigkeit, einzelne Sterne in Galaxien aufzulösen, die weiter als etwa 15 Millionen Lichtjahre entfernt sind. Wir sind daher gezwungen, deren stellaren Inhalt und Entstehungsgeschichte mit Hilfe des integralen Lichtes von Millionen von Sternen abzuschätzen. Insbesondere gibt es keine

einzigste elliptische Riesengalaxie, die nahe genug wäre, um vollständig in einzelne Sterne aufgelöst zu werden – eine Situation, die zu einer jahrzehntelangen Debatte über die Sternentstehungsgeschichte solcher Systeme geführt hat. LINC-NIRVANA wird in der Lage sein, Sternpopulationen in Galaxien aufzulösen, die bis zu 60 Millionen Lichtjahre entfernt sind. Zudem kannes das Alter sowie den Metallgehalt der Sterne mittels einer Kombination aus Schmal- und Breitbandfiltern untersuchen. Mit dem LBT werden 100 leuchtkräftige Galaxien für diese Art von Studien zugänglich sein, im Unterschied zu den vier Galaxien heute.

Optisches Layout

Die Abbildungen IV.1.7 und IV.1.8 geben eine Übersicht über die optomechanische Konstruktion von LINC-NIRVANA. Der Strahlvereiniger sitzt an einer der gemeinsam genutzten geknickten Fokalstationen auf der zentralen Instrumentenplattform (Abb. IV.1.1), wobei sich die Fokalebenen des Teleskops knapp innerhalb des Instrumentengehäuses befinden. Sämtliche optische Komponenten sind auf einer formstabilen optischen Bank aus Kohlenstofffaser montiert. Diese sorgt nicht nur für mechanische Steifigkeit und minimiert Temperatureffekte, sondern sie hat auch noch Platz für zukünftige Experimente und Erweiterungen.

Abb. IV.1.7: Der Strahlengang von LINC-NIRVANA. Details sind im Text erklärt. Die mechanischen Komponenten sind in Abb. IV.1.8 dargestellt.



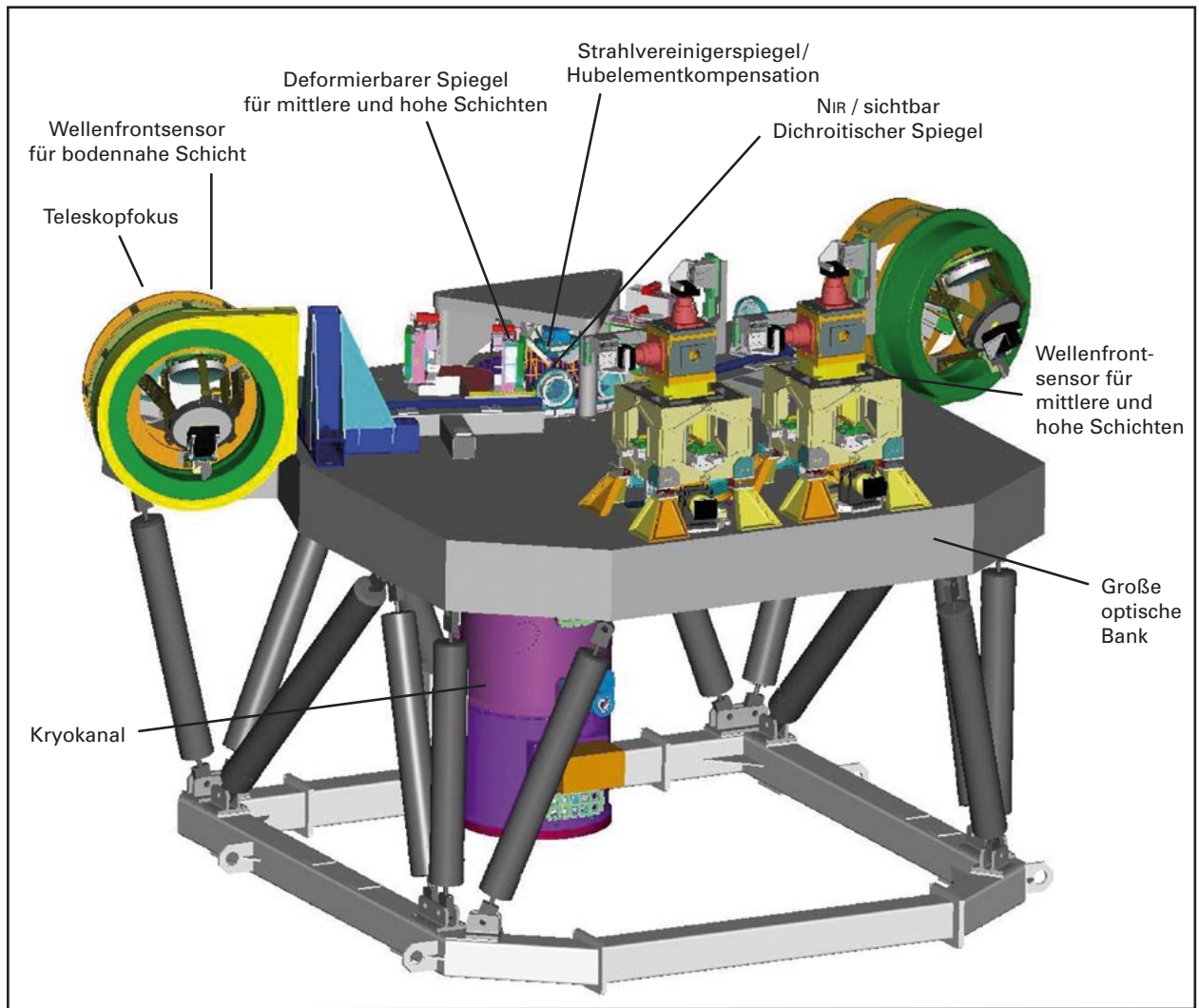


Abb. IV.1.8: Die mechanischen Komponenten im Strahlengang von LINC-NIRVANA.

Warme Voroptik

Unmittelbar vor den Teleskopfokalebenen lenkt ein ringförmiger Spiegel den Bereich des Gesichtsfeldes zwischen 2 und 6 Bogenminuten Abstand vom Feldzentrum in die Bodenschicht-Wellenfrontsensoren (»Ground-Layer Wavefront Sensors«, GWS) um. Dieser Spiegel ist in Abb. IV.1.7 als gestrichelter Umriss dargestellt; die GWS sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht hier sondern in Abb. IV.1.8 abgebildet. Die GWS messen die Turbulenz direkt oberhalb des Teleskops, indem sie bis zu 12 natürliche Leitsterne in diesem ringförmigen Gebiet abtasten. Sie senden ihre Korrektursignale an die adaptiven Sekundärspiegel, die jeweils 672 Aktuatoren besitzen (siehe »Die Multikonjugierte Adaptive Optik«).

Licht aus den zentralen zwei Bogenminuten des Gesichtsfeldes fällt im Instrument bis zu einem aus sechs Linsen bestehenden »Quasi-Kollimator«. Dieser erzeugt

einen nahezu parallelen Strahl mit der Eigenschaft, dass die Strahlenbündel aus dem zwei Bogenminuten großen Feld eine Umhüllende mit konstantem Durchmesser erzeugen. Damit ist es möglich, sämtliche (teuren) Aktuatoren in den weiter hinten gelegenen deformierbaren Xinetics-Spiegeln zu nutzen.

Der Strahlengang wird zweimal in sich selbst zu einem »Z« gefaltet; der eine, letztendlich vielleicht auch beide, dieser Faltspiegel ist ein deformierbarer Xinetics-Spiegel (DM) mit 349 Aktuatoren. Adaptive Optik ist am effektivsten, wenn der deformierbare Spiegel die Schicht der atmosphärischen Turbulenz direkt optisch bearbeiten kann. Der Xinetics DM ist auf eine Höhe zwischen 8 und 15 km eingestellt (»konjugiert«). (Der zweite Spiegel wird, falls er installiert wird, die Schichten zwischen 4 und 8 km erfassen). Die gesamte »Z«-Baueinheit kann hin und her bewegt werden, um die optimale Höhe der Turbulenz aufzufinden und/oder zu verfolgen. Nach der Doppelreflexion fallen die von beiden Teleskopen kommenden Strahlenbündel auf den longitudinal verschiebbaren Strahlvereinigerspiegel und werden dabei nach unten umgelenkt.

Bereich der Strahlvereinigung

Der longitudinale Spiegel übt zwei Funktionen aus. Erstens lenkt er die Strahlung nach unten zum Kryostaten im Wissenschaftskanal um. Zweitens kann er benutzt werden, um differentielle Längenunterschiede im Lichtweg zu korrigieren. Differentielle Längenunterschiede wird es geben, da die adaptiven Optiksyste-me, obwohl sie für ebene Wellenfronten sorgen, nicht die relative Ankunftszeit der Wellenfronten an den beiden Teleskopen steuern können. Kleine, durch die Atmosphäre verursachte Neigungen über die 23 m Basislänge setzen sich nach der AO-Korrektur in Längenunterschiede im Lichtweg um.

Der longitudinale Spiegel korrigiert solche Lichtweg-differenzen, indem er sich längs der Verbindungslinie zwischen den beiden Teleskopen hin und her bewegt und so den einen Arm des Interferometers verkürzt und den anderen verlängert, wobei er den dynamischen Korrekturbereich effektiv verdoppelt. Eine piezoelektrische Hochleistungsstufe liefert den nötigen Hub und die nötige Bandbreite.

Ein Paar dichroitischer Spiegel zwischen dem longitudinalen Spiegel und dem Kryostatenfenster lässt die Infrarotphotonen passieren, reflektiert jedoch das sichtbare Licht über eine vierelementige Kameralinse zu den Mittel- bis Oberschicht-Wellenfrontsensoren (»Mid-High Layer Wavefront Sensors«, MHWS – siehe unten).

Nahinfrarot-Wissenschaftskanal

Die Nahinfrarotstrahlung passiert die dichroitischen Spiegel und das Kryostatenfenster, wo eine kalte Maske überschüssige thermische Hintergrundstrahlung unterdrückt. Eine Kamera mit zwei reflektierenden Spiegeln innerhalb des Dewar erzeugt den endgültigen interferometrischen Fokus (Abb. VI.1.7). Der wissenschaftliche Sensor, ein HgCdTe-HAWAII-2-Detektor mit 2048×2048 Pixeln, sieht diese Strahlung als Reflektion von einem dichroitischen Infrarot-Infrarot-Strahlteiler. Der Sensor des Streifenmusterstabilisators nutzt das Nahinfrarotlicht außerhalb des reflektierten Bandes oder von außerhalb des wissenschaftlich genutzten Gesichtsfeldes, um den differentiellen atmosphärischen Längenunterschied im Lichtweg zu bestimmen. Das Interferenzstreifen-Korrektursignal steuert den piezoelektrischen Aktuator, der mit dem nach unten gerichteten Umlenkspiegel des Strahlvereinigers verbunden ist.

Man beachte, dass LINC-NIRVANA als Interferometer bezüglich der »Eintrittspupille«, das heißt der Teleskop-anordnung, feststehend sein muss. Da das LBT eine azimutale Montierung besitzt, führt die Erdrotation dazu, dass das wissenschaftlich genutzte Gesichtsfeld um die optische Achse rotiert, wodurch die Abbildung unscharf wird, wenn keine Korrekturmaßnahmen ergriffen werden. Der LINC-NIRVANA-Detektor ist auf einem präzisen Rotationsaufbau montiert, sodass Integrationen entsprechend einer Drehung des Himmels um 30° möglich sind.

Die Multikonjugierte Adaptive Optik

Multikonjugierte Adaptive Optiksyste-me (MCAO) nutzen die Tatsache, dass die Turbulenz in der Atmosphäre normalerweise auf einige wenige, voneinander getrennte Schichten beschränkt ist. Indem man optische konjugierte Punkte, oder Abbilder, der deformierbaren Spiegel in der Höhe dieser entscheidenden Schichten platziert, kann in einem großen Gesichtsfeld ein sehr hohes Korrekturniveau erzielt werden.

In seiner Grund- (der so genannten »LINC«-) Konfiguration nutzt LINC-NIRVANA einen einzelnen, axial gelegenen Stern zum Abtasten der Wellenfront sowie einen einzelnen deformierbaren Spiegel (entweder die adaptiven Sekundärspiegel oder die Xinetics-Einheiten) für die Korrektur. Dies ist klassische Adaptive Optik und entspricht im Wesentlichen der AO-Strategie der LBT-Einrichtung. Der LINC-Modus wird immer verfügbar sein, auch wenn weitere Möglichkeiten hinzukommen.

Durch Hinzufügen mehrerer natürlicher Leitsterne und »optischer Summation« wird das Instrument in seiner endgültigen Ausführung (dem so genannten »NIRVANA«-Modus) bis zu 20 Leitsterne pro Teleskop in einem bis zu 6 Bogenminuten großen Feld verwenden, um zwei, und später möglicherweise drei Atmosphärenschichten zu korrigieren.

LINC-NIRVANA reduziert die potenzielle Komplexität eines solchen MCAO-Systems, indem es die Schleifen, die die verschiedenen deformierbaren Spiegel steuern, effektiv entkoppelt. Die Bodenschicht-Wellenfrontsensoren (GWS) testen jeweils bis zu 12 Sterne in einem ringförmigen Bereich zwischen 2 und 6 Bogenminuten Durchmesser und steuern die mit 672 Aktuatoren versehenen deformierbaren Sekundärspiegel. Die einzelnen Sternmessköpfe bestehen aus einer optischen Pyramide und einem Feldvergrößerer. Die AO-Sekundärspiegel sind optisch mit einer ungefähr 100 m über dem Teleskop liegenden Schicht konjugiert. Das Licht von Sternen, die über einen relativ großen Winkel am Himmel verteilt sind, fällt durch den gleichen Abschnitt solcher tief gelegenen Schichten. Daher können die Leitsterne aus einem sehr großen Feld gewählt werden.

Die zweite Korrekturschleife verwendet die beiden deformierbaren Xinetics-Spiegel auf den weiter oben beschriebenen »Z«-Baueinheiten sowie die Mittel- und Oberschicht-Wellenfrontsensoren (MHWS). Diese Geräte empfangen das Licht, das von dem dichroitischen Visuell/Nahinfrarot-Spiegel im Strahlvereinigungsbereich reflektiert wird. Die MHWS wählen bis zu acht natürliche Leitsterne aus dem 2 Bogenminuten großen Zentralfeld und messen die Turbulenz in Höhen zwischen 8 und 15 km (die exakte konjugierte Höhe kann durch Verschieben der »Z«-Baueinheiten eingestellt werden). Die MHWS-Sternmessköpfe sind im Wesentlichen identisch mit denen in den GWS.

Wie beim wissenschaftlichen Detektor müssen die GWS und MHWS rotieren, um dem Himmel zu folgen. Bei den Bodenschichtsensoren wird dies erreicht, indem

das große Lager gedreht wird, auf dem die Wellenfrontbaueinheit montiert ist (Abb. IV.1.8). Bei den Mittel- und Oberschichtsensoren verwendet LINC-NIRVANA ein Paar Feldrotations-»K-Spiegel«-Baueinheiten (zu sehen in Abb. IV.1.7 und IV.1.8).

Sucherkamera

Zur Unterstützung beim Auffinden des Feldes und bei der Platzierung der Wellenfrontsensormessköpfe befindet sich direkt neben jedem MHWS eine im sichtbaren Licht arbeitende »Sucherkamera« (patrol camera, in den Abbildungen IV.1.7 und IV.1.8 nicht gezeigt). Diese Kameras empfangen alles, einen Teil oder gar nichts vom sichtbaren Licht, je nachdem welche der verschiedenen Spiegel/Strahlteiler unter den MHWS in Position sind.

Künftige Optionen

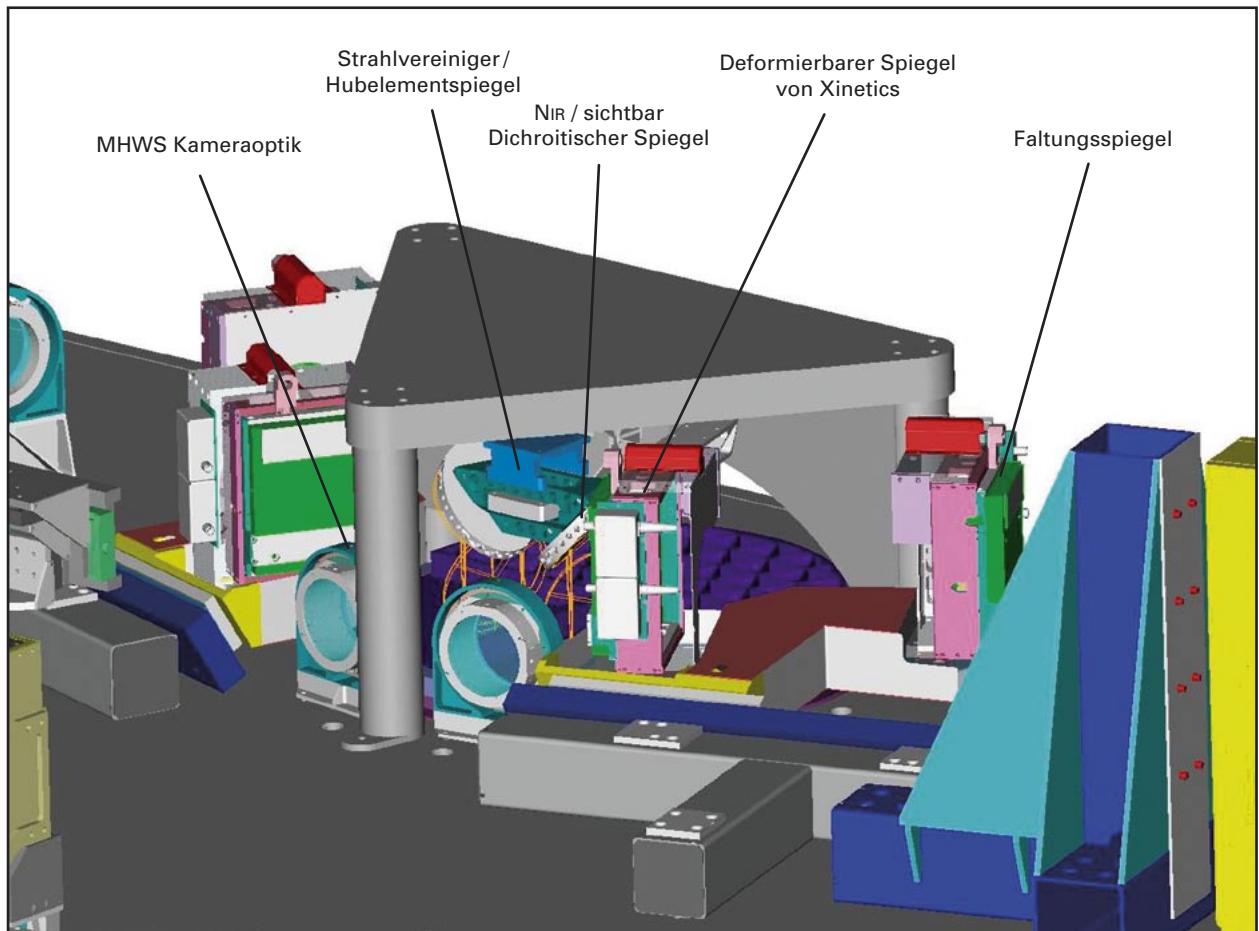
Gewiss ist LINC-NIRVANA ein äußerst anspruchsvolles Instrument und wir haben vor, bei seiner Implementierung sehr methodisch vorzugehen (siehe unten). Nichtsdestoweniger haben wir in seinem Grundentwurf eine Reihe von Erweiterungsmöglichkeiten vorgesehen. Dazu gehören:

- Ein zusätzlicher DM pro Arm, der den zweiten, ebenen Spiegel in den »Z«-Baueinheiten ersetzt. Dieser deformierbare Spiegel könnte dann mit Schichten zwischen 4 und 8 km Höhe konjugiert werden. Ein Strahlteiler- und Fokusmechanismus in den MHWS versorgt die zusätzliche Schicht.
- Stärkere Sucherkameras mit größeren Gesichtsfeldern.
- Verbesserte CCDs in den Wellenfrontsensoren. Dazu gehört die neue Generation der L3CCDs mit »verschwindendem Ausleserauschen«.

Implementierungsplan

Unser Ziel ist es, LINC-NIRVANA ans Teleskop zu bringen, sobald es interessante Wissenschaft liefern kann. Natürlich wäre es zu ehrgeizig, beim Ersten Licht sämtliche Untersysteme und Modi betriebsbereit haben zu wollen. Wir haben daher einen Implementierungsablauf geplant, der das komplexe Vorhaben in eine Reihe sich steigender Ziele aufteilt:

Abb. IV.1.9: Bereich der Strahlvereinigung mit den deformierbaren Spiegeln von Xinetics, dem longitudinalen Spiegel und den Visuell/Nahinfrarot-Strahlteilern.



1. Bildinterferometrie im Nahinfrarotbereich mit einem Paar einzelner axial angeordneter Wellenfrontsensoren (»LINC«-Modus). Das Ziel ist, sobald wie möglich wissenschaftlich brauchbare Daten zu erhalten und Leistungsstufen zu erreichen, die für den Routinebetrieb geeignet sind.
2. Demonstration der Bodenschicht-Wellenfrontsensoren. Diese Phase sieht nicht-interferometrische, beugungsbegrenzte Beobachtungen vor, wobei die GWS die adaptiven Sekundärspiegel steuern und nach Möglichkeit versucht werden soll, interferometrische Messungen zu erhalten.
3. Multikonjugierte adaptive Optik mit einer einzelnen Teleskopöffnung (nicht-interferometrisch). Dieser Modus verwendet gleichzeitig die GWS und MHWS. Ziel ist, die durch die MCAO bewirkte Vergrößerung des Gesichtsfeldes und der Himmelsüberdeckung zu demonstrieren.
4. Volle MCAO-Interferometrie. Dies ist der endgültige »NIRVANA«-Modus mit interferometrischen Beobachtungen und voller MCAO.

Um die Leistungsfähigkeit von LINC-NIRVANA effektiv nutzen zu können, wird ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Konstruktion und Inbetriebnahme dieser Modi und der Durchführung wissenschaftlicher Beobachtungen unumgänglich sein. Wir gehen von einer Zeitskala von etwa zwei Jahren für den gesamten Implementierungsablauf aus, wobei es zwischen jedem Schritt erhebliche Zeitspannen für wissenschaftliche Beobachtungen geben wird.

Weitere Nachrichten und Informationen über LINC-NIRVANA findet man unter <http://www.mpia.de/LINC>.

(D. Andersen, H. Baumeister, A. Böhm, H. Bönnhardt, P. Bizzenberger, F. Briegel, S. Egner; W. Gaessler, B. Grimm, S. Hanke, T. Herbst (PI), M. Kürster (PM), W. Laun, U. Mall, L. Mohr, V. Naranjo, M. Ollivier, A. Pavlov, H.-W. Rix, R.-R. Rohloff, J. Schmidt, R. Soci, C. Storz, S. Ligori, R. Weiss, W. Xu.
Beteiligte Institute: INAF-Arcetri, I. Phys. Inst. Köln, MPIfR, Bonn)

IV.2 LUCIFER I/II

LUCIFER ist eine Kamera für das nahe Infrarot mit Gitterspektroskopie für den Einsatz am Large Binocular Telescope (LBT). Das Gerät wird vielfältig einsetzbar sein, hauptsächlich für extragalaktische Beobachtungsprogramme. Es wird von einem Konsortium von fünf Instituten entwickelt.

Die Projektleitung für LUCIFER (LBT NIR-Spectroscopic Utility with Camera and Integral-Field Unit for Extragalactic Research) liegt bei der Landessternwarte in Heidelberg; am MPIA wird die Ausleseelektronik entwickelt, das MPI für Extraterrestrische Physik in Garching

ist zuständig für die Entwicklung der Mos-Einheit, die Universität Bochum liefert die Software, und die Fachhochschule Mannheim ist für den Entwurf der kryomechanischen Komponenten zuständig. LUCIFER wird in zwei identischen Exemplaren gebaut, die im Abstand von etwa einem Jahr am LBT in Betrieb gehen sollen.

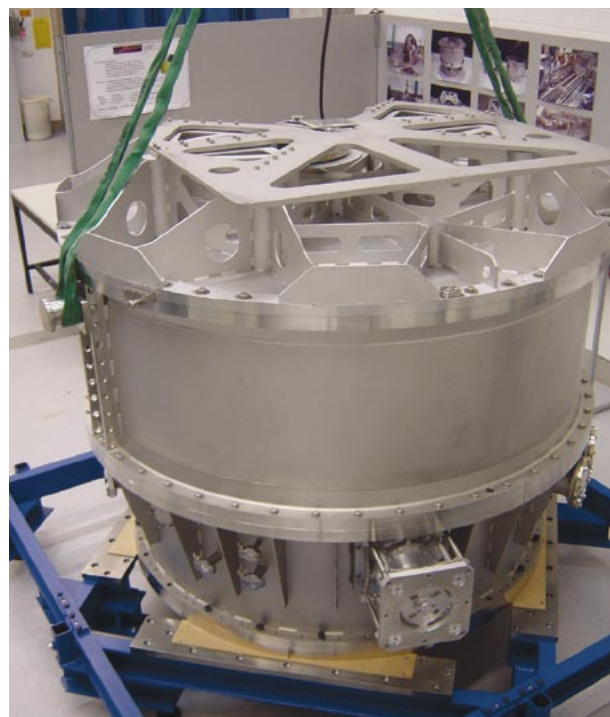
Im Berichtsjahr wurde der erste Kryostat bei Bieri (Zürich) fertiggestellt und ersten Evakuierungs- und Abkühltests unterworfen. Dieser Kryostat ist abgenommen und ausgeliefert, er wartet am MPIA auf die Integration der kryogenen Komponenten. Der Kryostat für LUCIFER II ist ebenfalls fertiggestellt, hier sind aber noch Nacharbeiten notwendig.

Die komplexe Mos-Masken-Wechseleinheit wurde ebenfalls ausgeliefert und wird gegenwärtig am MPE in umfangreichen Funktionstests geprüft und optimiert.

Die am MPIA entwickelte Auslese-Elektronik wurde auf 34 Kanäle erweitert, so dass die Referenz-Kanäle genutzt werden können. Eine komplette Auslese-Elektronik wurde an die Universität Bochum zur Software-Entwicklung ausgeliefert. Eine zweite steht am MPIA für die LUCIFER-Tests zur Verfügung. Im Herbst 2004 wurde auch der zweite HAWAII-Detektor (für LUCIFER II) geliefert.

(B. Grimm, W. Laun, R. Lenzen, R.-R. Rohloff.
Partner: Landessternwarte Heidelberg,
MPI für extraterrestrische Physik, Garching,
Universität Bochum, FH Mannheim)

Abb. 4.2.1: Der erste Kryostat (LUCIFER I) wird am MPIA angeliefert. Mit exzellenten Vakuum und Kryo-Verhalten steht er gegenwärtig zur Integration der kalten Komponenten bereit.



IV.3 MIDI, das Interferometer für das mittlere Infrarot am VLT

Das interferometrische Messinstrument MIDI (Mid-Infrared Interferometric Instrument) war Ende 2002 am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte ESO in Betrieb genommen und, nach einer kurzen Testphase, bereits 2003 sehr erfolgreich für wissenschaftliche Beobachtungen eingesetzt worden. Es führt das Licht von zweien der vier VLT-Teleskope zur Interferenz.

Das Jahr 2004 brachte zwei wichtige Meilensteine: Im April begann der für alle Beobachter offene Beobachtungsbetrieb mit MIDI am VLT und im August endete das offizielle Commissioning des MIDI-Instruments. Damit war MIDI de facto in die Hände von ESO übergegangen. Allerdings konnte der formale Akt der Übergabe noch nicht stattfinden, da noch einige Verhandlungen mit ESO über Ergänzungen vor allem im Software- und Dokumentationsbereich geführt wurden, die wohl erst zu Beginn 2005 zum Abschluss gebracht werden können.

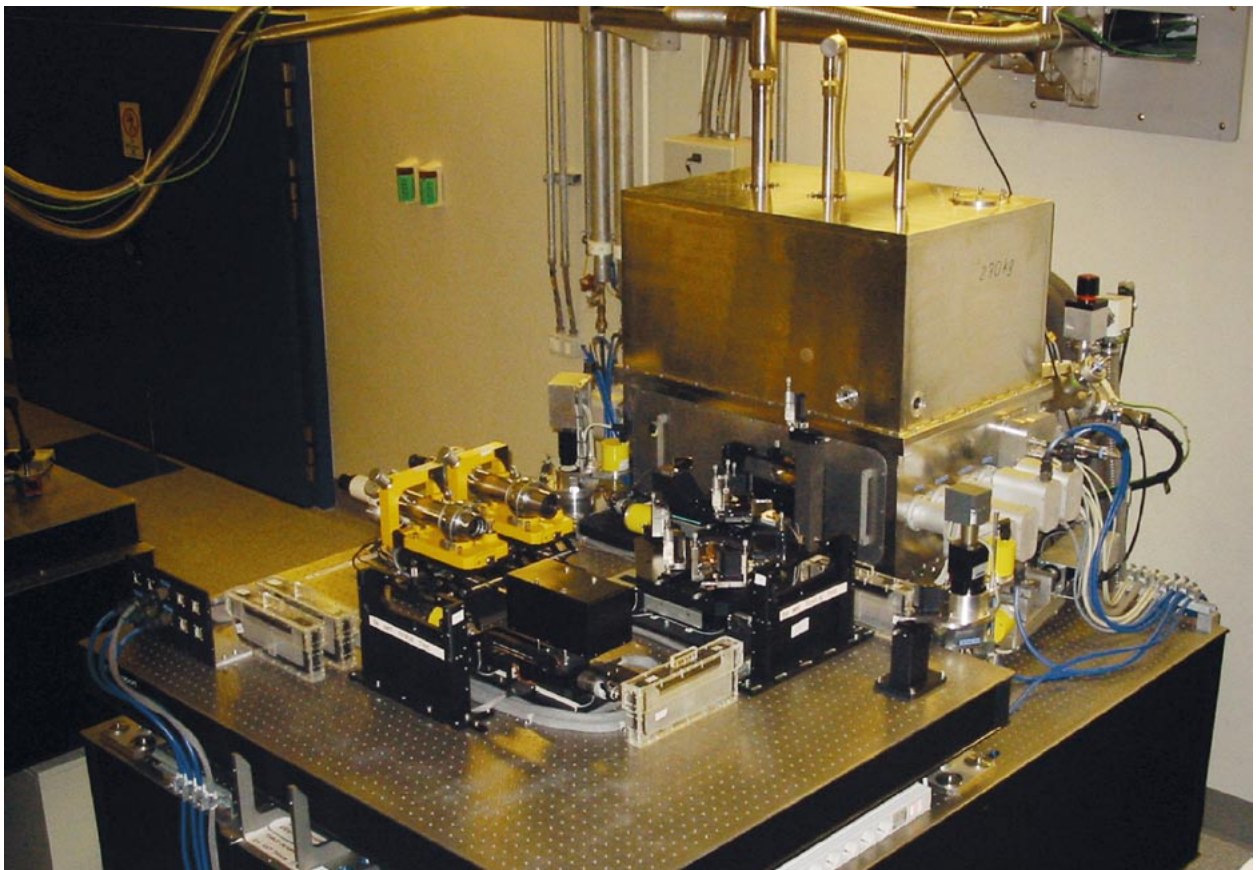
So schön dies erst einmal klingt, ist hierbei jedoch anzumerken, dass das MIDI-Instrument noch nicht mit seiner vollen Kapazität betrieben werden kann. Dies liegt im wesentlichen daran, dass das externe FRINGE-Tracking noch nicht zur Verfügung steht, da das dafür vorgesehene Instrument FINITO im Verlaufe des Jahres 2004 seine Funktionsfähigkeit noch nicht nachweisen

konnte. Dieser Umstand, sowie die weiterhin fehlenden Spiegel mit variabler Krümmung, welche die Pupille in das MIDI-Instrument abbilden sollen, führten dazu, dass MIDI nur mit eingeschränkter Empfindlichkeit arbeitete, und so nur Quellen heller als etwa 1 Jansky beobachten konnte. Mit externem FRINGE-Tracking sollte MIDI bis zu 5 Größenklassen empfindlicher sein.

Gegenwärtig beträgt die Genauigkeit der gemessenen Visibility nur etwa 10 – 15 Prozent. Für 2005 wird jedoch der sogenannte SCI-PHOT-Modus auch für die offenen Beobachtungen angeboten werden. Hierbei wird jeweils ein Teil des von den beiden Teleskopen gesammelten Lichtes ausgekoppelt und der photometrische Fluss von beiden Teleskopen parallel gemessen. Dieses Verfahren wurde während des Commissionings 2004 getestet und auch bei einigen Messungen des Garantiezeit-Programms angewendet. Damit konnte die Visibility auf etwa 3 – 5 Prozent genau bestimmt werden.

Während des Jahres 2004 verliefen auch die Messungen mit MIDI im SDT (Science Demonstration Time) und während der GTO (Guaranteed Time Observations) nach Plan. Auf Grund geringer Verzögerungen bei der Inbe-

Abb. IV.3.1: Das MIDI-Instrument. Das quaderförmige Vakuumgefäß rechts hinten beherbergt die strahlvereinigende gekühlte Optik und den Detektor. Davor die vorgelagerte »warme« Optik.



triebnahme der Auxiliary Telescopes musste auch das Commissioning von MIDI mit diesen 1.8-m-Teleskopen auf das Jahr 2005 verschoben werden. Dieses Commissioning wird nun von ESO selbst durchgeführt werden.

Auf dem Gebiet der Auswertesoftware wurde das am MPIA entwickelte Software-Paket MIA (MIDI Interactive data Analysis, R. Koehler) so weit entwickelt, dass es zusammen mit der an der Sterrewacht Leiden entwickelten Expert Workbench Software über das Internet zur Verfügung gestellt und an anderen Instituten eingesetzt werden konnte.

Die vorgesehene Erweiterungen für MIDI in den 20- μ m-Bereich (Q-Band) hinein wurde leider im September gestoppt, da man sich bei ESO nicht zu einer kurzfristigen Zusage für diese Erweiterung durchringen konnte. Damit wurde die Finanzierung bei unseren holländischen Partnern zurückgezogen und dieses Projekt musste eingestellt werden. Eine weitere Erweiterung, nämlich die Studie zum Ausbau von MIDI zu einem abbildendem 4-Kanal-Interferometer (»APRES-MIDI«) wurde hingegen mit Nachdruck weitergeführt. Der Kick-off für dieses Projekt, – im wesentlichen eine Kollaboration des Observatoire de la Côte d’Azur (PI: B. Lopez) mit dem MPIA, mit weiteren Beiträgen aus Paris, Lyon, Grenoble und dem MPI für Radioastronomie in Bonn, fand im Januar 2004 in Heidelberg statt.

Um mit APRES-MIDI (APerture Synthesis in the MIDI-Infrared) bis zu vier Teleskope zu kombinieren, soll über den optischen Elementen auf dem MIDI-Tisch (d.h. über der »warmen Optik«) ein zusätzlicher Aufbau angebracht werden, sodass der normale Betrieb von MIDI ohne Einschränkungen weiterhin möglich ist. Dabei werden die vier Strahlen so angeordnet, dass sie mit geringen Neigungswinkeln in der Pupille vereinigt werden und dort das typische Fringe-Muster erzeugen. Das Pupillenbild wird dann mit der in MIDI bereits vorhandenen Pupillenkamera auf den Detektor abgebildet.

In diesem Jahr wurde sowohl das Gesamtkonzept für APRES-MIDI erarbeitet, als auch detaillierte Untersuchungen zum Hardware-Design, zum Software-Konzept, zur Bildrekonstruktionsmethode sowie zu den zu erwartenden wissenschaftlichen Möglichkeiten von APRES-MIDI angestellt.

(MIDI: Ch. Leinert, U. Graser, Th. Ratzka,
O. Chesneau, R. Köhler, U. Neumann, C. Storz,
R. Mathar, N. Salm, W. Laun.

Partner: Sterrenkundig Instituut Anton Pannekoek/
Universität Amsterdam,
Sterrewacht Leiden, ASTRON/Dwingeloo,
Observatoire de Paris/Meudon,
Observatoire de la Côte d’Azur/Nizza,
Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg.
APRES-MIDI: F. Przygodda, S. Wolf, U. Graser,
Th. Henning, U. Neumann, R.-R. Rohloff.
Partner: Observatoire de la Côte d’Azur/Nizza,
MPI für Radioastronomie, Bonn.)

IV.4 CHEOPS – ein Instrument zur Abbildung extrasolarer Planeten

CHEOPS (Characterizing Exo-planets by Opto-infrared Polarimetry and Spectroscopy) ist ein ehrgeiziges Projekt zur direkten Abbildung extrasolarer Jupiter-ähnlicher Planeten. Es geht dabei um Planung und Bau eines Messinstruments der zweiten Generation für einen der vier 8-m-Spiegel des Very Large Telescope der ESO, mit dem sich die Planeten in nur einer halben Bogensekunde Abstand von ihrem mindestens 18 Größenklassen helleren Zentralstern abbilden lassen.

Wesentlicher Teil des Projektes ist die Entwicklung eines Instrumentes für das VLT, welches dieses Ziel erreichen helfen soll. Hierzu gab es im Dezember 2001 einen »Call for preliminary proposals« der ESO, dem ein internationales Konsortium unter Führung des MPIA folgte. Im Mai 2003 begann eine 18-monatige Machbarkeitsstudie, in deren Rahmen ein Konzept für das Instrument bis zur Stufe eines detaillierten, konzeptionellen Designs entwickelt wurde. Das Instrument besteht aus einem »eXtremen« Adaptiven Optik-System (XAO) und zwei differentiell abbildenden Komponenten – dem differentiellen Polarimeter ZIMPOL und einem 3D-Spektrographen für das nahe Infrarot. Das gesamte Instrument soll zum Zwecke höchster Stabilität fest auf der Nasmyth-Plattform des VLT montiert werden (siehe Abb IV.4.1.)

Die Studienphase endete im November 2004. Im September wurde auf Schloss Ringberg eine Abschluss-tagung des Konsortiums veranstaltet, bei der die letzten Probleme des instrumentellen Konzeptes sowie des Gesamtprojektes identifiziert wurden. Nach Abgabe der Dokumentation im November 2004 veranstaltete ESO im Dezember einen »selection review«. Das Ergebnis wird für Anfang 2005 erwartet.

Im Rahmen des Projektes wird aus Modellen zur Planetentstehung, der räumlichen Verteilung nahegelegener Sterne sowie deren Altersstruktur, Metallizität usw. auch ein Beobachtungsprogramm entwickelt, welches zur direkten Abbildung mehrerer extrasolarer Gasplaneten in verschiedenen Altersstufen (10^7 Jahre, 10^8 Jahre, 10^9 Jahre und älter) führen soll. Das Beobachtungsprogramm wird bis hin zur detaillierten Planung der Objektliste spezifiziert.

(M. Feldt (PI), W. Brandner, Th. Henning,
S. Hippler (PM); F. Masciadri, R. Köhler, R. Lenzen,
K. Wagner, J. Setiawan, A. Berton, F. de Bonis.
Astrophysikalisches Institut der Universität Jena,
Thüringer Landessternwarte, Astronomisches Institut
der Universität Amsterdam, Sterrewacht Leiden,
ASTRON Leiden, Astronomisches Institut der ETH
Zürich, Dipartimento di Astrofisica e Osservatorio
dell’Università di Padova, Osservatorio di
Capodimonte, Napoli, Universität Lissabon)

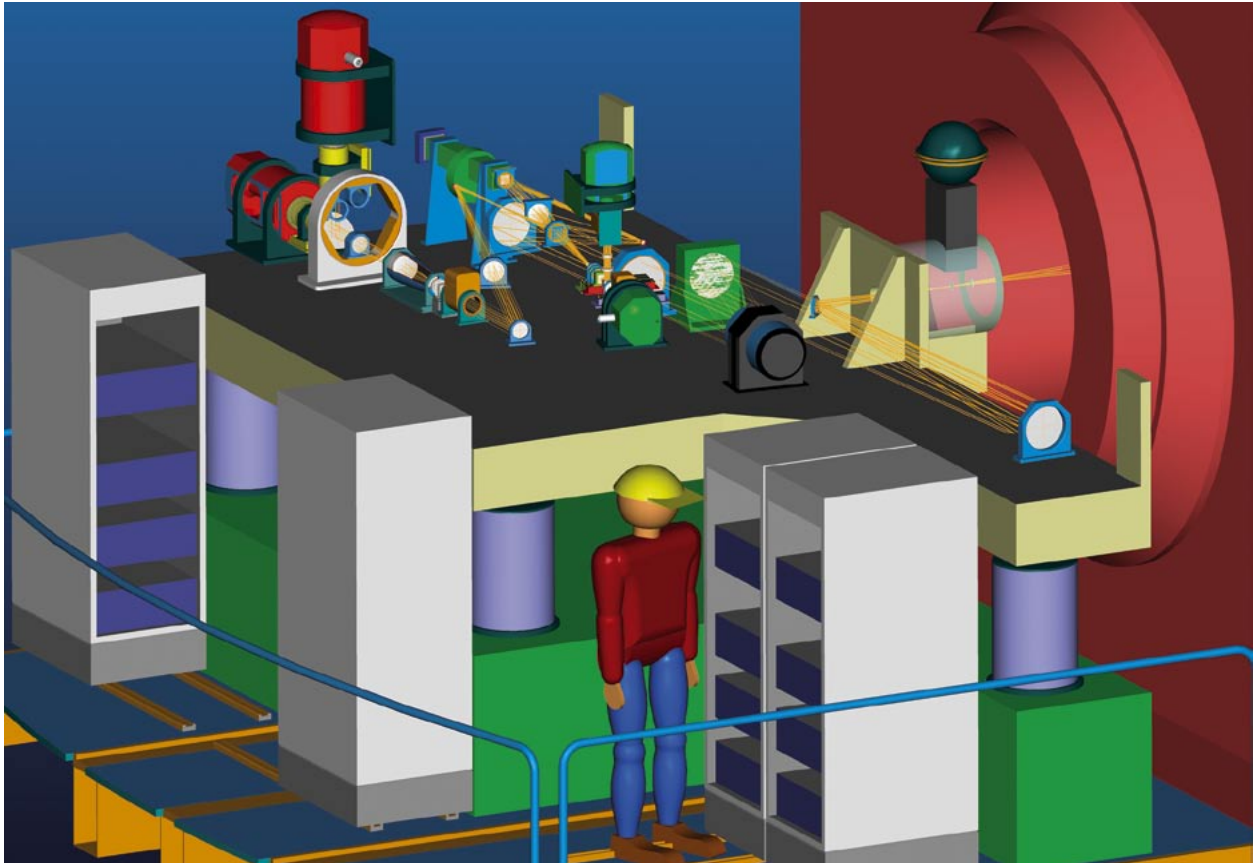


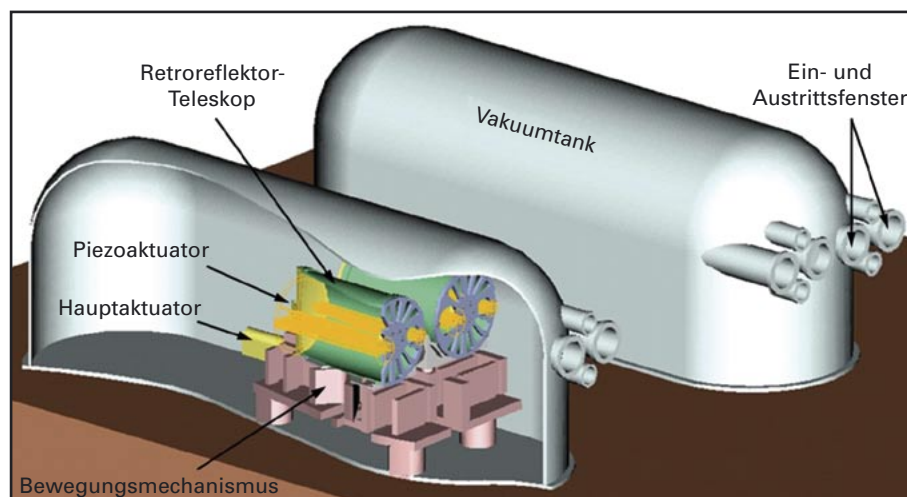
Abb. IV.4.1: Aufbau des Instruments CHEOPS (Entwurf)

Abb. IV.5.1: Das Konzept der Differentiellen Delaylines für PRIMA. In einem Vakuumtank befinden sich jeweils zwei linear verstellbare Retroreflektorteleskope. Optische Wegunterschiede werden sowohl durch Verschiebungen des gesamten Teleskops als auch durch feinste Verschiebungen des kleinen dritten Spiegels erreicht. Ein Laser-Messsystem misst diese Verschiebungen mit Nanometergenauigkeit.

IV.5 Differentielle Delaylines für VLTI-PRIMA

An der Europäischen Südsternwarte (ESO) wird zur Zeit das Instrument für »Phase-Referenced Imaging and Micro-arcsecond Astrometry« (PRIMA) für das Very Large Telescope Interferometer (VLTI) auf dem Cerro Paranal in Chile entwickelt. Das MPIA ist an diesem Projekt beteiligt.

Mit PRIMA werden gleichzeitig zwei Objekte innerhalb eines größeren Gesichtsfeldes (Durchmesser: 1 Bogenminute) interferometrisch zu beobachten sein. Wenn ei-



nes der beiden Objekte als Referenzstern benutzt wird, können für das andere Objekt Störungen durch atmosphärische Turbulenz in Realzeit kompensiert werden, was zu einer erhöhten Winkelauflösung und größerer Empfindlichkeit führt. Die letztlich angestrebte astrometrische Genauigkeit (Positionsmessung am Himmel) von 10 Mikrobogensekunden – das entspricht dem scheinbaren Durchmesser eines menschlichen Haares in 2000 km Entfernung – wird PRIMA jedoch erst durch die Hinzufügung von Differentiellen Delaylines erreichen.

Das MPIA ist leitender Partner in einem internationalen Konsortium (gemeinsam mit den Sternwarten Leiden und Genf) zur Entwicklung dieser Differentiellen Delaylines sowie der gesamten astrometrischen Datenreduktions-Software. Schwerpunkt der Arbeiten am MPIA ist die Entwicklung der optomechanischen Komponenten, einer Art hochpräzisen und beweglichen Katzenaugen-Teleskops mit 20 cm Öffnung. In Verbindung mit einem linearen Bewegungsmechanismus und im Vakuum angeordnet, werden diese Delaylines optische Wegunterschiede von bis zu 12 cm Nanometer-genau ausgleichen; das entspricht einer Genauigkeit von $1 : 10^8$.

Derzeit befindet sich das Projekt noch in der vorläufigen Designphase. Es werden Fehlerbudgets und Herstellungstoleranzen für das optische System und verschiedene mechanische Konzepte erarbeitet. Die Anforderungen an mechanische und optische Genauigkeit bewegen sich dabei an der Grenze des technologisch machbaren. Das vorläufige Designreview ist für die erste Jahreshälfte 2005 geplant.

Wissenschaftliches Ziel dieser Entwicklung ist die Durchführung eines astrometrischen Planetensuchprogramms. Durch die Beobachtung von kleinen Positionsveränderungen eines Sterns infolge der gravitativen

Wechselwirkung mit einem ansonsten unsichtbaren Planeten sollen Saturn- und Uranus-ähnliche Planeten bei bis zu 60 Lichtjahren entfernten Sternen nachgewiesen und deren genaue Massenwerte und Bahnparameter bestimmt werden. Der Abschluss der Instrumentierungsarbeiten und der Beginn des Planetensuchprogramms ist für das Jahr 2007 geplant.

*(Harald Baumeister, Peter Bizenberger,
Thomas Henning (PI), Ralf Launhardt
(Projektwissenschaftler, PM Optomechanik),
Ralf-Rainer Rohloff, Johny Setiawan, Karl Wagner.
Partner: Observatoire de Genève, Sterrewacht Leiden)*

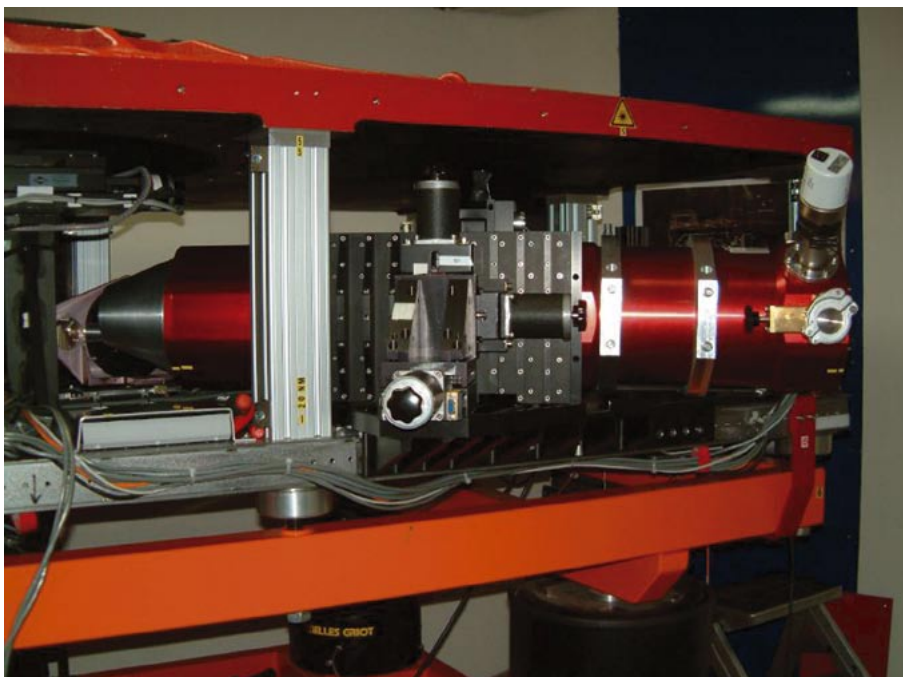
IV.6 Der Wellenfrontsensor PYRAMIR

PYRAMIR ist ein neuartiger Wellenfrontsensor für das nahe Infrarot. Er soll in der Adaptiven Optik ALFA am 3.5-m-Teleskop auf dem Calar Alto zum Einsatz kommen und wird dort den klassischen, im Sichtbaren arbeitenden Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor ergänzen.

Ähnlich dem Shack-Hartmann-Sensor liefert PYRAMIR ein Signal, das ein Maß für die lokale Neigung der Wellenfront ist. Mit diesem Signal wird die Verformung eines deformierbaren Spiegels so gesteuert, dass die lokale Neigung der Wellenfront korrigiert wird.

Die Designphase für PYRAMIR wurde Ende 2003 abgeschlossen. Alle Komponenten – DEWAR, HAWAII-I-Detektor, Ausleseelektronik, Echtzeitcomputer, Ansteuerlek-

Abb. IV.6.1: Der rote Zylinder innerhalb der Adaptiven Optik ALFA beinhaltet den Wellenfrontsensor PYRAMIR.



tronik für den deformierbaren Spiegel mit 2.1 Gbit »Reflective Memory Interface«, optische Komponenten, Motoren, Metrologie, Software, etc. – wurden in den Jahren 2003 und 2004 beschafft. Schwierigkeiten bei der Lieferung der kalten Optik zögerten den Abschluss dieser Phase bis voraussichtlich März 2005 hinaus.

Im Laufe des Jahres wurden das Kühlgefäß beschafft sowie die einzufügenden Komponenten am MPIA angefertigt. Das Kühlen des Instrumentes sowie die Funktion aller Motoren und des Detektors wurden bis Ende 2004 am MPIA getestet. Im Oktober 2004 erfolgte auch der erste Einbau in die ALFA-Optik auf dem Calar Alto. Hier wurde auch die Verbindung zum Echtzeit-Computer sowie zur neu beschafften Ansteuerelektronik für den deformierbaren Spiegel getestet. Diese Tests verliefen, abgesehen von kleineren, mittlerweile behobenen Problemen, erfolgreich. Nach der Lieferung der kalten Optik – voraussichtlich im März 2005 – wird eine testweise Beleuchtung und ein Probebetrieb des Echtzeitsystems am MPIA stattfinden. Der erste Einsatz am Nachthimmel ist numehr für Juni 2005 vorgesehen.

(H. Baumeister, P. Bizenberger, W. Brandner, J. Costa, B. Grimm, M. Feldt (PI), Th. Henning, S. Hippler (PM), W. Laun, S. Ligori, R.-R. Rohloff, R. Ragazzoni, D. Peter, N. Salm, C. Storz, K. Wagner)

IV.7 Erneuerung des Steuersystems am 3.5-m-Teleskop

Gründe für die Erneuerung

Das 3.5-m-Teleskop wurde Anfang der 1980er in Betrieb genommen. Während die Mechanik noch gut funktioniert, haben viele elektronische und Computerbauteile das Ende ihrer Lebensdauer erreicht. Technologische Änderungen haben in den letzten Jahren den Austausch von Bauteilen zunehmend erschwert: Viele Teile – sowohl Original- als auch gleichwertige Teile – sind schlicht nicht mehr erhältlich. Um den Verlust von Beobachtungszeit durch technische Ausfälle zu vermeiden, wurde beschlossen, das Teleskopsteuerungssystem komplett zu erneuern, d.h. Computer, Bus-System und praktisch sämtliche elektronische Hardware zu ersetzen.

Das Konzept des neuen Steuerungssystems

Das Originalsteuerungssystem bestand aus einem zentralen LSI 11-Computer, der mit den verschiedenen Antriebs- und Steuerungseinheiten durch ein umfassendes DMA-Bus-System verbunden war. Im Gegensatz dazu verwendet das neue, von R. Wolf konzipierte Teleskopsteuerungssystem eine Sun-Workstation mit einem Standard-Solaris-Betriebssystem als Leitrechner für fünf VME-Computer, welche die Antriebe steuern. Die

Workstation dient auch als Router in das öffentliche Calar-Alto-Netzwerk. Die Kommunikation mit dem Operator findet über eine grafische Benutzeroberfläche auf einem Linux-PC statt. Alle Computer kommunizieren miteinander über ein privates Ethernet-Netzwerk, das von außen nicht direkt zugänglich ist. Die VME-Computer sind an verschiedenen Stellen in der Nähe der entsprechenden Teleskopelektronik platziert. Diese sind: Hauptelektronik-Schrank (2. Stock), Bedienpult (Kontrollraum), Gabelmontierung (Gabel), Tubus (innerhalb des Teleskoptubus) und S5-Elektronikschrank für den Coudé-Spiegel (Coudé-Ebene). Der Linux-PC befindet sich im Hauptpult. Die Zykluszeit des IO-Systems ist auf 20 Hz gesetzt worden, um eine ausreichende Echtzeitreaktion auf Veränderungen und von der Hardware ausgelöste Ereignisse zu ermöglichen. Die Software ist in mehreren Ebenen organisiert. Die erste Ebene ist die Schnittstelle zum Beobachter/Personal (GUI), die die Auswahl von fünf Betriebsarten ermöglicht. Die zweite Ebene steuert die Teleskopantriebe für Rekt-azension, Deklination, Fokus, Cassegrain-Flansch, Azimuth und Höhe des Coudé-S5-Spiegels sowie die Kuppelstellung. Diese Task berechnet viermal pro Sekunde alle notwendigen astronomischen und intern genutzten Daten, die aus den Eingabedaten der Antriebe bezogen werden, wie Encoderwerte, Weltzeit, Luftmasse, Aktualisierung der Korrektur der Teleskopausrichtung, Refraktion usw. Die dritte Ebene dient zum Schutz der Instrumente. Sie steuert Grenzscharter, Stopp-Positionen und den aktuellen Zustand der Antriebe. Sie bildet auch die Schnittstelle zu den Antrieben, die in der Ebene unterhalb des Instrumentenschutzes zu finden sind. Ein Watchdog überwacht alle fünf VME-Systeme und die Tasks, die auf ihnen laufen, sowie Programme, die auf der Sun laufen, indem er alle vier Sekunden eine Überprüfung der Lebensfunktionen durchführt. Reagieren alle Systeme innerhalb der erwarteten Frist, wird der Watchdog zurückgesetzt und die Überprüfung des Systems vier Sekunden später wiederholt. Reagieren nicht alle Systeme, wird die Elektronik der Antriebe und die Stromzufuhr der VME abgeschaltet. Das System wird auch abgeschaltet, wenn der Watchdog-Prozess selbst ausfällt.

Verwirklichung und gegenwärtiger Stand

Da das Teleskopsteuerungssystem sehr komplex ist, wurde beschlossen, seine Erneuerung in zwei Phasen zu unterteilen. Phase I beinhaltet den Austausch des Computers und des Bus-Systems, Phase II den Austausch der Motorsteuerungen einschließlich der Regelkreise der Antriebe in Stunde und Deklination. Die Probleme in Phase I bestehen hauptsächlich darin, einen stabilen Betrieb des Computersystems zu erreichen und zudem alle Funktionen des Systems zur Verfügung zu stellen. Nach sorgfältiger Vorbereitung wurden Hard- und

Software für Phase I im April und Mai 2004 installiert. Es stellte sich sehr rasch heraus, dass das Konzept verlässlich ist. Die Verluste an Beobachtungszeit aufgrund von Problemen mit dem Teleskopsteuerungssystem betrugen zu Beginn größenordnungsmäßig weniger als eine Stunde pro Nacht. Die Protokollierung der Teleskopaktionen und die Auswertung von Fehlern und Störungen führten rasch zu enormen Verbesserungen. Seit Dezember 2004 ist Phase I in einem stabilen Zustand, alle für astronomische Beobachtungen benötigten Funktionen sind verfügbar. Um Phase I zu beenden, muss noch das Auslesen einiger Teleskopparameter eingefügt und das vorläufige GUI durch das endgültige ersetzt werden. Diese Arbeiten sollten Anfang 2005 abgeschlossen sein. Phase II beinhaltet den Austausch der Motorsteuerelektronik für die Antriebe des Cassegrain-Flansches, des Fokus und der Stunden- und Deklinationsachse. Die Verwendung moderner digitaler Ausgabestufen sollte zu relativ einfach zu verwirklichenden Lösungen führen. Wir hoffen, das Projekt Anfang 2006 abschließen zu können.

(Karl Zimmermann, Rainer Wolf, Josef Fried)

IV.8 PACS – Ferninfrarot-Kamera und Spektrometer für das Weltraumteleskop HERSCHEL

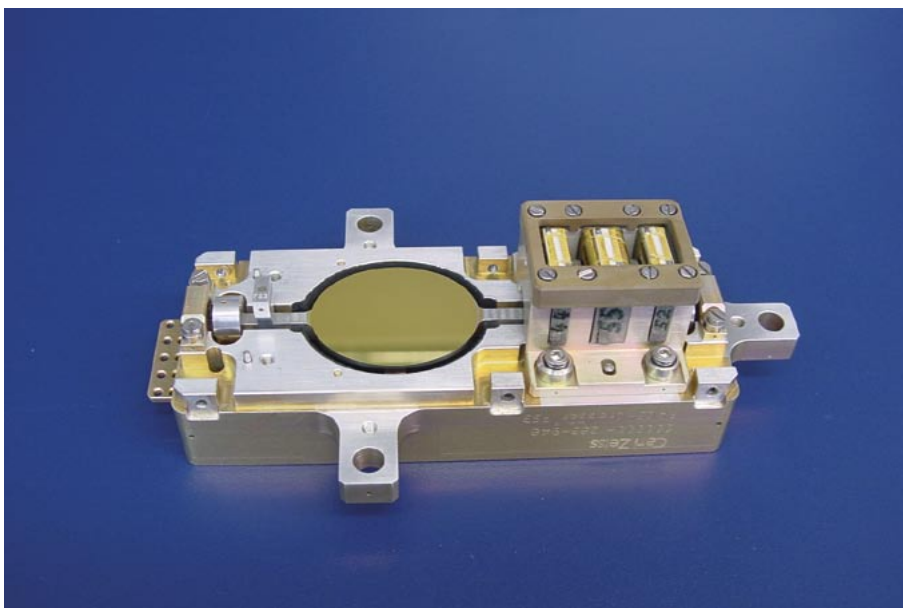
Im Jahr 2007 wird die Europäische Weltraumagentur ESA das Ferninfrarot- und Submm- Weltraum-Observatorium HERSCHEL und den Kosmologie-Satelliten PLANCK mit einer ARIANE-5-Rakete in den Lagrange-Punkt L2 befördern. In 1.5 Mio. km antisolarer Entfernung von der Erde kühlt sich der 3.5-m-Hauptspiegel von HERSCHEL durch Abstrahlung auf $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab. Mit dieser Verringerung der thermischen Eigenstrahlung des Teleskops

werden sehr empfindliche Messungen im Fernen Infrarot- und Submm-Bereich bei Wellenlängen von 60 bis 600 Mikrometern möglich. Drei Fokalebenen-Instrumente (PACS, SPIRE und HIFI) bilden die aus dem Weltall einfallende Strahlung mit räumlich hochauflösenden Kameras ab und analysieren sie mit Spektrometern mittlerer und hoher spektraler Auflösung.

Das PACS-Instrument wird unter der Leitung des MPE Garching von elf europäischen Instituten gemeinsam entwickelt. Das MPIA ist das größte deutsche Co-Investigator-Institut und für wichtige Komponenten und Aufgaben verantwortlich: die Entwicklung des Fokalebenen-Choppers, die Charakterisierung der Ferninfrarot-Kameras für den Spektrometer-Teil und die Kalibration des Instrumentes in Bodentests – und später im Flug.

Der Fokalebenen-Chopper ist ein 30 mm großer »Wackelspiegel«, der äußerst genau mit einer Rechteck-Modulation mit Frequenzen bis zu 10 Hz zwei benachbarte Himmelsfelder vergleicht. Durch Subtraktion der in beiden Feldern gleichen Untergrundstrahlung kann das kleine Signal der interessierenden kosmischen Quelle extrahiert werden. Basierend auf der Prototyp-Entwicklung am MPIA baut die Firma Zeiss das Flugmodell des Choppers (Abb. IV.8.1). Diese Arbeiten waren Ende 2004 fast abgeschlossen, als sich zwei unerwartete Probleme ergaben: (1) bei kalten ($-200\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Abb. IV.8.1: Das Flugmodell des PACS-Fokalebenen-Choppers. Der vergoldete Spiegel hat einen maximalen Durchmesser von 32 mm. Links ist eine der Aufhängungen in einem CuBe-Kreuzfedergelenk zu erkennen, rechts die drei Spulenkörper für 10 μm dicke hochreine Al-Drähte. Im Instrument ist der Chopper in einem infrarot-schwarzen Gehäuse mit Streulichtblenden untergebracht, das für diese Abbildung entfernt wurde. (MPIA und Zeiss)



Vibrationstests mit dem 30-fachen der Erdbeschleunigung (30 G) zur Simulation des Raketenstarts hatten sich geringe Verschiebungen zwischen der elektrischen und mechanischen Nulllage der Chopperachse ergeben, und (2) nach sieben Kalt-Warm-Zyklen ($-270\text{ °C} \rightarrow +300\text{ °C} \rightarrow -270\text{ °C}$) zeigten die vergoldeten Spiegeloberflächen kleine »Pickel« (~ 5 Mikrometer Höhe). Obwohl beide Abweichungen noch einen Einsatz im PACS-Flugmodell erlaubt hätten, wurde vorsichtshalber eine gründliche Untersuchung beschlossen, um sicherzustellen, dass beide Fehler sich bis zum Start und danach nicht weiter vergrößern. Noch vor Weihnachten begann am MPIA ein zehnfacher zyklischer Kalt-Warm-Test in einem Helium-Kryostaten mit sieben verschiedenartig vergoldeten Testspiegeln.

Den bei Empfindlichkeits-Vergleichsmessungen an den Germanium-Gallium-Infrarot-Kameras an verschiedenen Instituten gefundenen Unterschieden wurde durch weitere Eichmessungen am MPIA nachgegangen (Abb. IV.8.2). Es wurden endgültige und zuverlässige Werte für die Stromempfindlichkeit und das Rauschen ermittelt. Eine neue Generation der kalten Vorverstärker, bestehend aus integrierten kalten Ausleseschaltkreisen (CREs) wurde am MPIA gründlich bei der Temperatur des flüssigen Heliums (-270 °C) charakterisiert. Dabei wurden deutliche Verbesserungen gegenüber dem Qualifikationsmodell festgestellt, die diese neuen CREs als für das Flugmodell PACS geeignet erscheinen lassen.

Die ersten Versuche zur Simulation von Strahlenschäden an den Detektoren, verursacht durch kosmische Partikel, wurden mit Hilfe radioaktiver Gamma-Quellen begonnen. Diese Schäden konnten wie bei unserem ISO-

PHOT-Instrument durch intensive Bestrahlung mit Infrarotlicht ausgeheilt werden. Im Rahmen ihrer Doktorarbeit wird eine Mitarbeiterin unseres Teams Methoden für den stabilen Betrieb der Detektoren unter laufendem Beschuss durch simulierte kosmische Partikel erarbeiten. Dazu müssen optimale Betriebswerte für die Kameras (Temperatur, elektrische Vorspannung und Photonenuntergrund) ermittelt und die stabile Eichung der Kamera über lange Zeit nachgewiesen werden. Diese Untersuchungen sind deshalb so wichtig, weil die Rohdaten an Bord von HERSCHEL für die Funkübertragung zur Bodenstation stark komprimiert werden müssen. Nur sorgfältige Befreiung von Störimpulsen (»Cosmics«) und stabile Stromempfindlichkeit der Detektoren ermöglichen die präzise Kalibration der astrophysikalischen Daten.

Im Herbst beteiligte sich das MPIA an den Bodenkalttests des PACS-Qualifikationsmodells in Garching. Dazu war das Instrument in einem großen Kryostaten installiert, der auch eine Teleskopsimulationsoptik und Eichquellen enthielt. Ferner wurden externe Eichquellen mit Lochmasken zur Simulation von Punktquellen sowie Gaszellen zur Wellenlängeneichung verwendet. Das Instrument wurde mit der ersten Version der Kommando-Software gesteuert und die empfangenen wissenschaftlichen Daten mit den Prototypen der Quick-Look-

Abb. IV.8.2: Vorbereitung von Untersuchungen an einer Ge:Ga-Detektorzeile der PACS-Infrarot-Kamera. Das U-förmige Profil dient dem Druckmechanismus auf die Detektorzeile. Damit kann die langwellige Empfindlichkeitsgrenze bis zu $\lambda < 200$ Mikrometer ausgedehnt werden.



Analyse in Echtzeit und der Interaktiven Analyse nachträglich analysiert. In Vorbereitung dieser Tests waren am MPIA zahlreiche Kalibrations- und Kommandoprozeduren entwickelt worden. Bereits während der Tests und in den Folgemonaten wurden Testberichte erstellt und mit den Spezifikationen verglichen, um Verbesserungen für das Flugmodell einzuleiten.

Für ihre Beiträge zur Entwicklung des PACS-Instrumentes erhalten Wissenschaftler des MPIA 300 Stunden garantierte Beobachtungszeit mit HERSCHEL. Sie wurden überwiegend in zwei große »Schlüsselprojekte« mit höchster Priorität für die Ausführung eingebracht: 1. Quasare bei hohen Rotverschiebungen, und 2. Sternentstehungsgebiete, bei denen ein größerer Anteil aus Entdeckungen der ISO-Zufallsdurchmusterung (ISOSS) stammt. Weitere Garantiezeitanteile des MPIA gehen in die Beteiligung an anderen Schlüsselprojekten (leuchtkräftige Galaxien, ...) ein. Zusätzlich werden Schlüsselprojekte (mit über 100 Stunden Beobachtungszeit) für die Offene Beobachtungszeit aufgelegt; unter der Führung des MPIA ist ein umfangreiches Beobachtungsteam für elliptische Galaxien bereits organisiert.

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

IV.9 MIRI und NIRSPEC – Instrumente für das James Webb Space Telescope (JWST)

Das JWST soll im Jahr 2011 als Nachfolger des wissenschaftlich äußerst erfolgreichen Weltraumteleskops HUBBLE unter der Führung der NASA gestartet werden. Die Ziele dieser Mission sind: (1) die Beobachtung der ersten Sterne/Galaxien/Quasare im jungen Universum, (2) die Untersuchung der Entwicklung der Galaxien bis zum heutigen Anblick des Universums, (3) die Beobachtung der Entstehung von Sternen, Planeten und der Voraussetzungen für die Entstehung von Leben. Diese Untersuchungen im hochrotverschobenen, staubverhüllten und kühlen Universum werden im infraroten Spektralbereich durchgeführt. Das MPIA ist an der Instrumentierung beteiligt.

Der 6.5-m-Hauptspiegel des JWST wird durch Abstrahlung auf $-230\text{ }^{\circ}\text{C}$ gekühlt, um die empfindlichen Kameras nicht durch die eigene Wärmestrahlung zu blen-

Abb. IV.9.1: Ein 1:1-Modell des JWST vor einer Ausstellungshalle in Texas zeigt die gewaltige Größe dieses Satelliten-Observatoriums. Der 6.5-m-Hauptspiegel ist aus 18 einzelnen Berylliumspiegeln mit je 1.3 m Durchmesser zusammengesetzt. Der gesamte Satellit einschließlich des tennisplatzgroßen Strahlungsschildes wird stark zusammengefoldet in der Nutzlastspitze einer ARIANE-5-Rakete auf die Bahn um L2 transportiert. Über 100 Mechanismen sorgen dann für Entfaltung und Justierung.



den. Diese »passive Kühlung« ist im Lagrange-Punkt L2 in 1.5 Mio. Kilometer antisolarem Abstand von der Erde möglich. Dorthin soll das JWST durch eine ARIANE-5-Rakete befördert werden. Von drei Fokalebenen-Instrumenten des JWST kommen eineinhalb aus Europa: NIRSPEC – das Multiobjekt-Spektrometer (zu ~ 90 %) und MIRI-Kamera und Spektrometer für das mittlere Infrarot (zu ~ 50 %).

Für beide Instrumente hat MPIA die Filter- und Gitterräder entworfen, basierend auf unserem erfolgreichen Konzept der ISOPHOT-Filterräder: Direktantrieb mit einem Torque-Motor, exakte Positionierung mit einer Sperrklinke. Diese Anordnung führt bei höchster Zuverlässigkeit beim Betrieb im Kryovakuum zu äußerst geringen thermischen Verlustleistungen, da Rückkopplungen und Halteströme vermieden werden. Das wurde mit drei Filterrädern während der 29-monatigen ISO-Mission bei über 1 Mio. störungsfreien Schritten gezeigt.

Am MPIA wurden für die beiden konkurrierenden NIRSPEC-Phase A*-Studien der Firmenkonsortien ASTRIUM und ALCATEL die Radkonzepte entworfen. Nach der Entscheidung der ESA für das NIRSPEC-Angebot des ASTRIUM-Konsortiums und einer erneuten Ausschreibung der Filter-/Gitterräder hat das MPIA gemeinsam mit Zeiss und Austrian Aerospace ein Angebot erarbeitet, bei dem das MPIA als kleinster der drei Partner technische Erfahrungen aus früheren Missionen, die elek-

trischen Antriebe und die Durchführung von Kalttests beitragen würde. Durch diesen Beitrag werden starke Synergien zur bereits bestehenden Verpflichtung zum Bau der MIRI-Räder erwartet. Als möglicher Fokussiermechanismus für NIRSPEC wurde ein ursprünglich im NASA-Auftrag für die Ausrichtung der Hauptspiegelsegmente des JWST entwickelter Linearantrieb der Firma Moog, Kalifornien, gemeinsam mit ESA beschafft. Ausführliche Kryovakuumtests dieser Komponenten in den Kryostaten des MPIA zeigten einen unerwartet frühen Ausfall des Antriebes, der deshalb zur Analyse zum Hersteller zurückgeschickt werden musste.

H. W. Rix wurde gegen bedeutende Konkurrenz von ESA als einer der Mission Scientists für NIRSPEC ernannt.

Im europäischen MIRI-Konsortium ist das MPIA für die Entwicklung und Lieferung des Filterrades und der beiden Spektrometer-Räder verantwortlich. Das Konsortium besteht aus 21 über Europa verteilten wissenschaftlichen Instituten, dementsprechend groß ist die Zahl der Schnittstellen zwischen den einzelnen Beiträgen. Für das MPIA bedeutet das beispielsweise laufende und exakte Abstimmung mit (1) CEA, Paris zur Filterradscheibe, die dort mit Filtern, Koronographenmasken und einem Prisma bestückt wird, zu (2) ASTRON, Dwingeloo, den Herstellern der Gitterradscheibe, zu (3) AIT, Edinburgh, den Herstellern der Strahlteilerscheibe, zu (4) dem PSI, Villigen, wo der kalte Kabelbaum hergestellt und die Kalttestkammer betrieben wird, zu (5) dem CSL, Lüttich, dem Hersteller der warmen Bord-Elektronik, u.v.a. Die Vorentwicklungen der Radarantenne am MPIA wurden durch zwei kleinere Studien bei Zeiss zu mechanischen und thermalen Fragen vertieft, nützliche Anregungen wurden auch bei mehreren Expertenbesuchen durch ESA und NASA am MPIA empfangen. Die Phase B der

Abb. IV.9.2: Das Filterrad des MIRI-Instruments ist auf seinen 18 Positionen mit Breit- und Schmalbandfiltern, mit Koronographenmasken und einem Prisma für Spektrophotometrie bestückt. Im Zentrum des Rades ist der Direktantrieb untergebracht, am Umfang des Rades sind die Index-Kugellager und die Sperrklinke zu sehen. Der Durchmesser des Rades beträgt 25 cm, die Positionierungsgenauigkeit beträgt < 4".

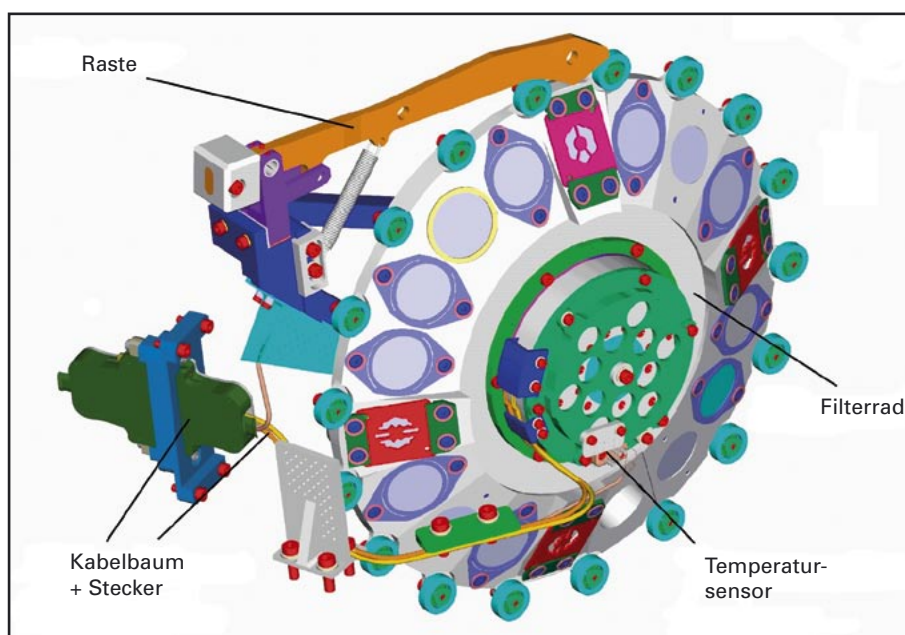




Abb. IV.9.3: Eingangsinspektion an den Kryo-Torque-Motoren im Reinraum des MPIA. Die UV-Lampe dient dem Auffinden möglicher Verschmutzungen, einer hohen Gefahr für die zentralen Lager der Filter- und Gitterräder. Alle mechanischen Teile der Motoren werden in den Werkstätten des MPIA ge-

gestützten Testgeräte bauen, um sie an verschiedene Institute des MIRI-Konsortiums zu Subsystem- und Systemtests auszuleihen.

Ein Antrag auf Finanzierung der bevorstehenden Industriearbeiten wurde vom DLR kurz vor Jahresende bewilligt. Die Ausschreibung zur Einholung von Industrieangeboten für den Bau der Flugmodelle konnte noch vor Weihnachten im Europäischen Amtsblatt veröffentlicht werden. Es besteht die Absicht, diese Flug- und Flugersatzmodelle der Filter- und Gitterräder, den Vorentwicklungen des MPIA folgend, bei einer inländischen Luft- und Raumfahrt-Firma bauen zu lassen. Das MPIA wird durch wesentliche und laufende Beiträge zum elektrischen Teil und zu allen Kalttests die Kosten vergleichsweise gering halten.

Auch wenn die Beobachtungen mit dem JWST erst nach dem Jahr 2012 möglich sind, werden in regelmäßigen Wissenschaftler-Treffen der beteiligten Institute die aktualisierten wissenschaftlichen Ziele der Mission mit den zwischenzeitlich erreichten und voraussichtlichen Leistungsdaten des MIRI-Instruments verglichen. Dabei werden auch bereits Vorbereitungen für die Eichung der Instrumente an Himmelsstandards und optimierte Beobachtungserfahrungen für die Mission diskutiert.

MIRI-Entwicklung wurde im Herbst mit dem »Preliminary Design Review« bei ESA erfolgreich abgeschlossen. Seitdem befindet sich das Projekt in der Bauphase C/D, die mit der Beschaffung der wichtigsten Komponenten (Kryo-Torque-Motoren, integrierte vorgespannte Kugellager usw.) und dem Fertigen aller Teile für die ersten »Entwicklungsmodelle« begonnen wurde. Parallel zu diesen Arbeiten läuft die Entwicklung eines Bodentestgerätes (EGSE) für alle Radarantriebe, mit denen die unterschiedlichen Betriebsbedingungen des Satelliten (warm beim Start, kalt in L2) simuliert werden können. Insgesamt wird das MPIA fünf dieser rechner-

*(Dietrich Lemke, Armin Böhm,
Fulvio de Bonis, Monica Ebert,
Ulrich Grözing, Ralph Hofferbert,
Thomas Henning, Armin Huber,
Ulrich Klaas, Sven Kuhlmann,
Jose Ramos, Ralf-Rainer Rohloff,
Johanna Rosenberger)*

V Menschen und Ereignisse

V.1 Die Einweihung des Large Binocular Telescope

Am 16. Oktober wurde das zukünftige weltweit größte Einzelteleskop, das Large Binocular Telescope auf dem Mount Graham in Arizona, der Öffentlichkeit vorgestellt. An der Eröffnungsfeier nahmen hochrangige Vertreter aus Wissenschaft und Politik teil. Für das MPIA, bei dem die Leitung der deutschen LBT-Beteiligungsgesellschaft liegt, war dieses Ereignis einer der Höhepunkte des Jahres. Die beiden Direktoren, Thomas Henning und Hans-Walter Rix, sowie der Projektwissenschaftler des LBT in Deutschland, Tom Herbst, und Verwaltungsleiter Mathias Voss waren als Vertreter des Instituts zusammen mit dem Vizepräsidenten der Max-Planck-Gesellschaft Kurt Mehlhorn nach Arizona gereist. In Deutschland war die Einweihung des LBT ein außergewöhnlicher Medienerfolg.

In sichtlich guter Laune erlebten rund hundert Gäste die Einweihung des Doppelteleskops auf dem Mount Graham nahe Tucson, Arizona. Deutschland ist im Rah-

men der LBT-Beteiligungsgesellschaft zu 25 Prozent an dem Projekt beteiligt. »Damit sichern wir uns ein Viertel der gesamten Beobachtungszeit an diesem einzigartigen Teleskop der Superlative«, erklärte Tom Herbst. Bei der Einweihungsfeier war erst ein Hauptspiegel installiert. Ende 2005 soll auch der zweite Hauptspiegel im Teleskop sein – damit wird das LBT seine volle Lichtstärke erhalten.

Eine weitere Ausbaustufe soll Ende des Jahres 2007 erreicht werden, wenn das am Heidelberger MPIA gebaute Instrument LINC-NIRVANA installiert wird (siehe Kap. IV.1). Dieses Gerät führt das von den beiden Spiegeln gesammelte Licht mit höchster Präzision in einer gemeinsamen Brennebene zusammen und überlagert es zu einem Interferogramm. Eine Adaptive Optik wird zudem Bildstörungen, die durch Turbulenzen entlang des Lichtweges durch die Erdatmosphäre entstehen, kompensieren. »Mit diesem Schritt wird das LBT eine bis zu zehnmal so hohe Bildschärfe wie das Weltraumteleskop HUBBLE erreichen«, sagte Hans-Walter Rix.

Neben Astronomen des MPIA waren auch Vertreter der Landessternwarte Heidelberg, des Astrophysikalischen Instituts Potsdam, sowie der Max-Planck-Institute für extraterrestrische Physik und Radioastronomie auf den Mount Graham gereist. Die Max-Planck-Gesellschaft war

Abb. V.1.1: Das weitgehend fertig montierte Teleskop im Juni 2004: Der erste Hauptspiegel ist installiert, hoch darüber ist die Primärfokus-Kamera LBC 1 für den roten Spektralbereich zu erkennen.

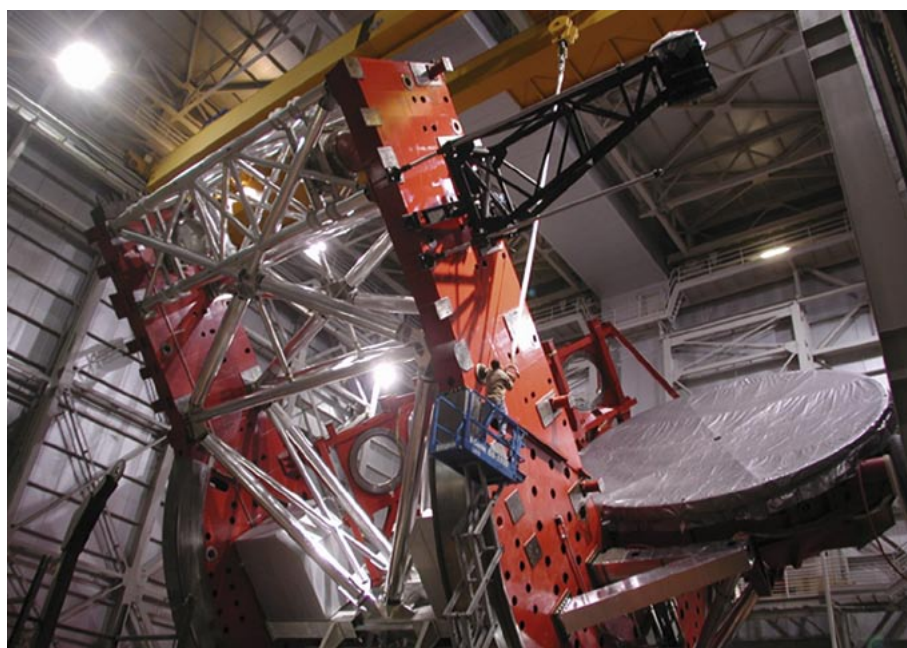
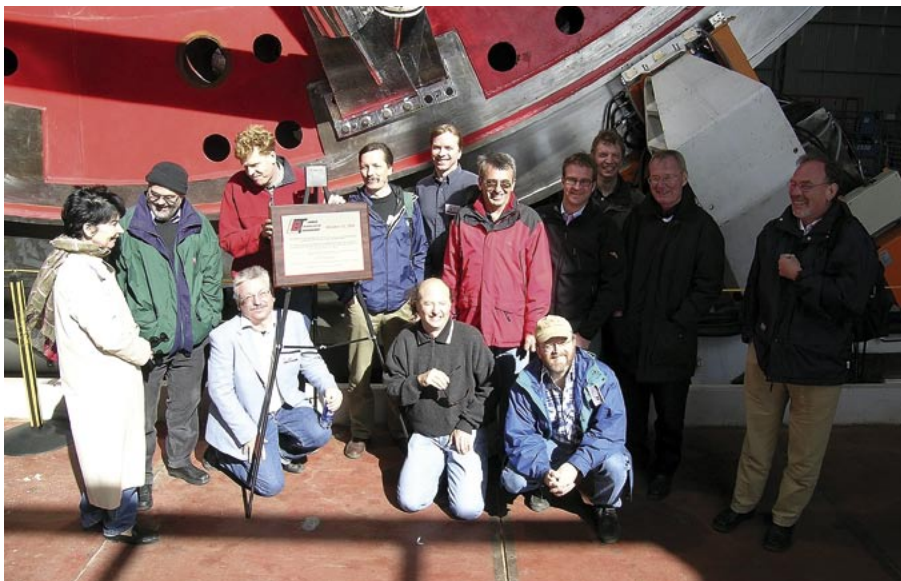




Abb. V.1.2: Das Gebäude des LBT.

Abb. V.1.3: Die deutsche Delegation vor dem LBT. Von links nach rechts stehend: Konstanze Pistor (Ministerium Land Brandenburg), Kurt Mehlhorn (MPG), Hans-Walter Rix, Thomas Henning (beide MPIA), Matthew Lehnert (MPE), Michael Truchsess (MPG), Markus Schleier (MPG), Matthias Steinmetz (AIP), Olaf Henkel (Leibniz-Gesellschaft), Peter Stolz (AIP). Vorne hockend: Günther Hasinger (MPE), Klaus Strassmeier (AIP), Tom Herbst (MPIA).



durch ihren Vizepräsidenten Kurt Mehlhorn, Schatzmeister Michael Truchsess und Markus Schleier vertreten. Als politische Vertreter waren Olaf Henkel, Präsident der Leibniz Gesellschaft, und Matthias Schenek, Vertreter des Wissenschaftsministeriums von Baden-Württemberg, angereist. Auch Steve Beckwith ließ sich als ehemaliger Direktor des MPIA und jetziges Auswärtiges Wissenschaftliches Mitglied die Gelegenheit nicht entgehen, das LBT zu besichtigen.

In Deutschland war die Eröffnungsfeier von einem einzigartigen Interesse der Medien begleitet. Das MPIA hatte eine umfangreiche Pressemappe erstellt und an zahlreiche Redaktionen verschickt, und eine Pressekonferenz abgehalten. Die Resonanz überraschte alle: Insgesamt berichteten mehr als 180 Zeitungen in 770 Beiträgen darüber. Dabei waren alle bedeutenden überregionalen Tageszeitungen sowie Wochenmagazine wie Die Zeit und Der Spiegel vertreten. Hinzu kamen elf Fernsehbeiträge, darunter im Heute Journal und in der Tagesschau, sowie 18 Hörfunkbeiträge. Damit wurde über dieses Ereignis flächendeckend in ganz Deutschland berichtet. Das demonstriert einmal mehr das ungebrochene Interesse der Medien und der Öffentlichkeit an astronomischen Themen.

Deutschlands Beteiligung am LBT

Das Large Binocular Telescope wird bei der endgültigen Fertigstellung über zwei riesige Sammelspiegel mit jeweils 8.4 Metern Durchmesser verfügen. Sie sind auf einer gemeinsamen Montierung installiert und werden gleichzeitig auf ferne Himmelskörper ausgerichtet. Damit eröffnet sich eine einzigartige Möglichkeit, das LBT als Interferometer zu betreiben. Das 120 Millionen Dollar teure Observatorium steht auf dem 3190 Meter hohen Mount Graham in Arizona.



Abb. V.1.4: Rund hundert Astronomen und Entscheidungsträger waren angereist, um die Einweihung des LBT zu feiern.

Abb. V.1.5: Günther Hasinger, Kurt Mehlhorn und Hans-Walter Rix im Mirror Lab, wo der zweite Hauptspiegel poliert wird.



Das LBT wurde von einem internationalen Konsortium geplant und gebaut: Fünf deutsche Institute unter der Leitung des Max-Planck-Instituts für Astronomie (MPIA) in Heidelberg sind insgesamt zu einem Viertel beteiligt. Ihr Beitrag zur Realisierung des LBT konzentriert sich auf die technologisch anspruchsvollsten Entwicklungen im Bereich der Ausrüstung des Teleskops mit neuen Messgeräten. Die dabei gesammelten zukunftsweisenden Erfahrungen auf technologischem Neuland werden bei der Realisierung der Teleskope der nächsten Generation eine entscheidende Rolle spielen.

Die beiden LBT-Spiegel spannen zusammen eine Fläche von 110 Quadratmetern auf. Damit erzielen sie die Leistungsstärke eines einzelnen 12-Meter-Spiegels und die Bildschärfe eines einzelnen 23-Meter-Spiegels. Ein solcher gigantischer Einzelspiegel ist heute nicht realisierbar.

Das Doppelteleskop wird mit Hilfe zweier Leiteinrichtungen gesteuert. Sie positionieren das Teleskop und sorgen mit Hilfe eines Leitsterns auch für die exakte Nachführung. Das Licht des Leitsterns wird auch genutzt, um die Verformung des aktiv unterstützten Hauptspiegels ständig festzustellen und zu korrigieren, so dass er in jeder Lage des Teleskops in seiner idealen Form gehalten werden kann. Diese beiden »Acquisition, Guiding- und Wavefront-sensing Units« (AGW) werden am Astrophysikalischen Institut Potsdam (AIP) gebaut, mit Beiträgen von INAF-Arcetri, von der Landessternwarte Heidelberg und vom MPIA.

Anfänglich werden die Astronomen nur mit einem Spiegel beobachten, wobei ihnen zunächst eine Primärfokus-

Kamera und ab Ende 2005 ein Spektrograph mit dem Namen LUCIFER 1 zur Verfügung stehen werden. Dieser Spektrograph und sein Zwilling LUCIFER 2 entstehen in Deutschland (Landessternwarte Heidelberg, MPI für extraterrestrische Physik, Ruhr-Universität Bochum und Fachhochschule Mannheim). Das gesamte Instrument wird in den Labors des MPIA getestet und zusammengebaut (siehe Kap. IV.2). Zu diesen Instrumenten wird sich später noch ein hoch auflösender Spektrograph namens PEPSI gesellen, der am Astrophysikalischen Institut Potsdam gebaut wird.

Unter allen für das LBT entwickelten Instrumenten ist LINC-NIRVANA das ambitionierteste Vorhaben. Es kombiniert zwei optische Verfahren, deren ineinander greifende Funktionen schrittweise ausgebaut und erprobt werden. Mit diesem Instrument wird experimentelles Neuland betreten mit dem Ziel, dem theoretischen Auflösungsvermögen des Doppelspiegels auch in der Praxis immer näher zu kommen.

Die LBT Interferometric Camera (LINC) hat die Aufgabe, die Lichtbündel der beiden Hauptspiegel zusammenzuführen und in einer gemeinsamen Brennebene abzubilden. Dies erfordert äußerste Präzision, weil die beiden Lichtwege exakt gleich lang sein müssen. NIRVANA (Near-Infra-Red Visible Adaptive Interferometer for Astronomy) sorgt für die Beseitigung der Bildstörungen, die durch die turbulenten Bewegungen der Luft oberhalb des Teleskops entstehen. Nur damit erreicht das Doppelteleskop seine überragende räumliche Auflösung.

Neben seiner Rolle als Strahlvereiniger und als Infrarotkamera hat LINC-NIRVANA auch eine dritte, ganz



Abb. V.1.7: Der Vizepräsident der MPG, Kurt Mehlhorn, betonte die Spitzenstellung deutscher Astronomen.

entscheidende Funktion: die Adaptive Optik. Sie verleiht dem LBT »Weltraumqualität«. Auch hier wird am MPIA mit einer erweiterten Form der Adaptiven Optik, der so genannten multikonjugierten adaptiven Optik (MCAO) Neuland betreten.

Wenn alles nach Plan verläuft, wird die Entwicklung und Implementierung der multikonjugierten Adaptiven Optik in LINC-NIRVANA im Laufe des Jahres 2007 zum Abschluss kommen. Dann wird das LBT seine volle Leistungsfähigkeit erreicht haben.

Abb. V.1.6: Thomas Henning mit Marco Salvati vom Observatorium Arcetri



V.2 25 Jahre Calar-Alto-Observatorium

Am 28. September 2004 wurde das auf dem 2168 Meter hohen Berg Calar Alto in der Sierra de los Filabres gelegene Calar-Alto-Observatorium offiziell 25 Jahre alt. Mit dieser Außenstelle des MPIA stand Deutschlands Astronomen und ihren spanischen Kollegen erstmals ein Observatorium zur Verfügung, mit dem sie nach den beiden Weltkriegen wieder an die Weltspitze der Astronomie aufschließen konnten. Vier Teleskope unterschiedlicher Größe sowie Kameras und Spektrographen auf dem neuesten Stand der technologischen Entwicklung arbeiten dort seither an der vordersten Front der Forschung. Mit ihnen gelang in der Vergangenheit eine Reihe hervorragender Entdeckungen, und auch in Zukunft wird das Calar-Alto-Observatorium eine wichtige Rolle spielen. Anlässlich des Jubiläums endete am 16. September eine Etappe der spanischen Radrundfahrt Vuelta a España auf dem Calar Alto.

Neuanfang nach dem Krieg

Nach dem Zweiten Weltkrieg befand sich in Deutschland die beobachtende Astronomie in einem desolaten Zustand. Beobachtungsprogramme auf internationalem Niveau waren praktisch nicht möglich, denn das größte Teleskop in der Bundesrepublik war der Reflektor in Hamburg-Bergedorf aus dem Jahr 1910, dessen Spiegel einen Durchmesser von nur einem Meter besaß. An zweiter Stelle stand der 72-cm-Reflektor der Landessternwarte Heidelberg auf dem Königstuhl – Baujahr 1906.

Die entscheidende Wende brachte in dieser Situation die Denkschrift Zur Lage der Astronomie, die 1962 im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft erstellt wurde. Darin empfahlen die Astronomen insbesondere »die Errichtung von nationalen Einrichtungen überregionaler Art, wie einer optischen Sternwarte in günstigem Klima mit größeren Instrumenten«. Maßgeblich beteiligt an dieser Denkschrift war Hans Elsässer, der spätere Gründungsdirektor des MPIA.

Im Jahre 1967 beschloss der Senat der Max-Planck-Gesellschaft die Errichtung des MPIA und zweier Observatorien jeweils auf der Nord- und Südhalbkugel der Erde. Während sich die Pläne für das Südobservatorium in Namibia aus politischen Gründen zerschlugen, begann man bald mit dem Bau der Nordsternwarte in Südspanien. Auch für die spanischen Astronomen bedeutete die Möglichkeit, gemeinsam mit der MPG ein Observatorium zu errichten, einen Neustart. So kam es auf dem Calar Alto zum Bau eines zusätzlichen, rein spanischen Teleskops mit 1.52 Meter Öffnung.

Das Calar-Alto-Observatorium nahm seinen Betrieb in mehreren Etappen auf. Mitte 1975 ging das 1.2-Meter-

Abb. V.2.1: Das Calar-Alto-Observatorium. Blick von Norden auf die Teleskopkuppeln. Von links nach rechts: das 2.2-Meter-Teleskop, das spanische 1.5-Meter-Teleskop (im Vordergrund), das 1.2-Meter-Teleskop, der Schmidt-Spiegel und die 43 Meter hohe Kuppel des 3.5-Meter-Teleskops. Im Hintergrund die Küste bei Almeria.



Teleskop in Betrieb, 1979 folgte das 2.2-Meter-Teleskop. Als nächstes Teleskop brachte man den zuvor umgebauten Hamburger Schmidt-Spiegel auf den Berg, und schließlich erfolgte 1985 der Probebetrieb des 3.5-Meter-Teleskops, das seit Juli 1986 auch Gastbeobachtern zur Verfügung steht (Abb. V.2.2). Im Jahr 1988 galt der Aufbau des Calar-Alto-Observatoriums als abgeschlossen.

In den letzten Jahren wurden am MPIA eine Reihe von Kameras und Spektrographen gebaut, die zur Weltspitze gehören. Dazu zählen eine Kamera für das nahe Infrarot mit großem Gesichtsfeld, genannt OMEGA 2000, wie auch die im sichtbaren Licht arbeitende Kamera LAICA. Mit ihrem 4096×4096 Pixel großen CCD-Detektor lässt sich ein Himmelsfeld aufnehmen, das größer als der Vollmond ist. Zu diesen Kameras kommen Spektrographen, wie TWIN und OMEGACASS.

Technologische Pionierarbeit haben Astronomen und Techniker des MPIA bei Entwicklung und Bau einer Adaptiven Optik, genannt ALFA, geleistet. Hinzu kam als Novum ein künstlicher »Laser-Stern«. Die hiermit gewonnenen Erfahrungen werden am Very Large Telescope der ESO in Chile und am Large Binocular Telescope (LBT) auf dem Mount Graham in Arizona zum Tragen kommen.

Wissenschaftliche Highlights

In den Anfangsjahren des Calar Alto standen Sterne und Nebel unseres Milchstraßensystems im Zentrum der Forschung. Einen ersten Forschungsschwerpunkt bildete die Sternentstehung. Es folgte in den achtziger Jahren beispielsweise die Entdeckung von stark gebündelten Gasstrahlen, die von jungen Sternen ausgehen und mit Geschwindigkeiten von mehreren hundert Kilometern pro Sekunde ins All schießen (Abb. V.2.3). Diese so genann-

ten Jets stehen senkrecht auf der zirkumstellaren Staubscheibe und können eine Länge von mehreren Lichtjahren erreichen.

Als 1979 das 2.2-m-Teleskop in Betrieb ging, erschlossen sich die Astronomen endlich auch das Reich der fernen Galaxien. Ein Meilenstein war hier die Entdeckung der wechselwirkenden Galaxien. Heute ist dieses Forschungsgebiet auch deswegen aktuell, weil man vermutet, dass die riesigen Elliptischen Galaxien durch das Verschmelzen von Spiralgalaxien entstanden sind. Einen Forschungsschwerpunkt bildete auch das Phänomen der extragalaktischen Jets – Gasstrahlen, die von den Zentren aktiver Galaxien und Quasare ausgehen und sich bis zu mehreren Millionen Lichtjahre weit ins All erstrecken. Astronomen des MPIA haben zu der Entschlüsselung des Beschleunigungsvorgangs in den Jets wesentlich beigetragen.

Weitere Highlight waren die spektakulären Aufnahmen vom Einsturz des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf den Planeten Jupiter im Jahr 1994 (Abb. V. 2.4) und sechs Jahre später die Entdeckung freier planetenähnlicher Körper in einem Sternentstehungsgebiet im Sternbild Orion (Abb. V.2.5).

In jüngster Vergangenheit sind große Himmelsdurchmusterungen immer wichtiger geworden. Hier initiierten Astronomen des MPIA am 2.2- und 3.5-Meter-Teleskop das anspruchsvolle Beobachtungsprogramm CADIS (Calar Alto Deep Imaging Survey), mit dem Astronomen nach den ersten Galaxien im Universum suchen. Die dabei gewonnenen Erfahrungen waren die Voraussetzung für die Durchmusterung COMBO-17, die am ESO/MPG-2.2-Meter-Teleskop auf La Silla läuft. Voraussetzung hierfür ist der

Abb. V.2.2: Das 3.5-Meter-Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums.





Abb. V.2.3: (oben) Ein junger Stern (weißes Kreuz) tief im Innern der Molekülwolke L 1551. Er ist nur im infraroten Licht erkennbar. Der Stern emittiert einen hellen Jet aus ionisiertem Gas, beleuchtet den ausgedehnten Reflexionsnebel und regt die mit HH-28 und HH-29 bezeichneten Strukturen zum Leuchten an.

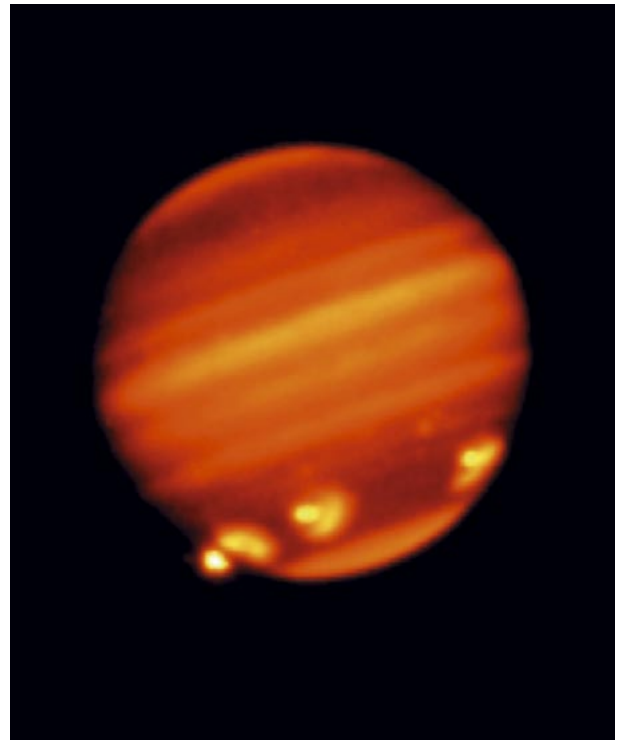
Abb. V.2.4: (unten) Jupiter am 20. Juli 1994, aufgenommen mit der Infrarotkamera MAGIC am 3.5-Meter-Teleskop auf dem Calar Alto. Am linken Rand ist die Explosionswolke nach dem Einschlag eines der letzten Fragmente des Kometen Shoemaker-Levy 9 zu erkennen. Rechts davon die heißen Spuren früherer Einschläge.

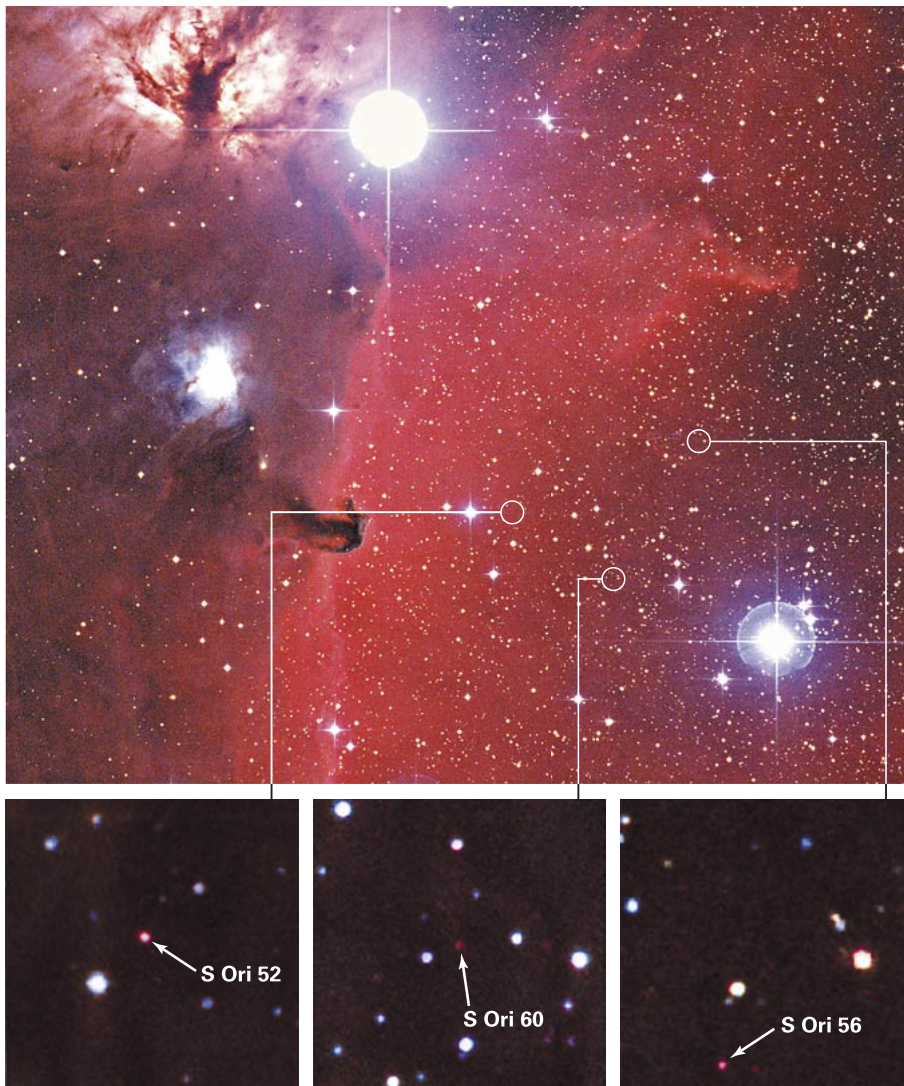
Einsatz einer Weitfeldkamera, die von Astronomen des MPIA entworfen und mit Kollegen der ESO gebaut wurde.

Neuerdings werden manche Teleskope in Netzwerken organisiert, um kurzfristig auf unvorhergesehene Ereignisse am Himmel reagieren zu können. Eines dieser Netze, in welches auch das Calar-Alto-Observatorium eingebunden ist, ist die »European Supernova Collaboration«. Mit ihr soll die Helligkeitsentwicklung von Supernovae ermittelt werden. Ebenso gehört der Calar Alto zu einem Alarmsystem für so genannte Gammastrahlen-Ausbrüche (Gamma Ray Bursts).

Die Zukunft des Calar-Alto-Observatoriums

Mit dem Bau der Teleskope der neuen Generation, die über Spiegel von acht bis zehn Metern Durchmesser verfügen, sind die älteren Teleskope mit drei bis vier Metern Öffnung keineswegs überflüssig geworden. Zum einen reicht die Zahl der neuesten Observatorien gar nicht aus, um alle wichtigen Beobachtungsprogramme ausführen zu können. Zum anderen gibt es auch viele wichtige Projekte, die keine Großteleskope erfordern, aber mit-





unter sehr zeitintensiv sind. Hierzu zählen die erwähnten Himmelsdurchmusterungen. Von großer Bedeutung werden zukünftig auch Projekte sein, bei denen Himmelskörper regelmäßig beobachtet werden müssen. Dies ist bei variablen Objekten der Fall.

Nicht zuletzt werden die Teleskope des Calar-Alto-Observatoriums weiterhin dazu dienen, neue wissenschaftliche Methoden und Techniken zu entwickeln, wie dies bei der Adaptiven Optik ALFA der Fall war.

In der Arbeitsweise des Calar-Alto-Observatoriums gibt es seit November 2004 eine wichtige Änderung. Es wurde ein Vertrag unterzeichnet, nach dem der spanische Consejo Superior de Investigaciones Científicas (vertreten durch das Instituto de Astrofísica de Andalucía) und die Max-Planck-Gesellschaft (vertreten durch das MPIA) das Observatorium als gleichberechtigte Partner betreiben werden. Die Vereinbarung beinhaltet eine gesicherte Finanzierung für Entwicklung und Bau neuer Messinstrumente, so dass die Leistungsfähigkeit des Observatoriums und die Kompetenz der Wissenschaftler auf instrumentellem Gebiet stets gewährleistet bleiben.

Abb. V.2.5: Frei fliegende planetenähnliche Körper im Orion-Komplex.

Abb. V.2.6: Zu Ehren des 25-jährigen Bestehens des Observatoriums endete eine Etappe der spanischen Radrundfahrt La Vuelta auf dem Gipfel des Calar Alto.



V.3 Die European Interferometry Initiative

Die European Interferometry Initiative (EII) wurde am 30. Januar 2002 in Heidelberg ins Leben gerufen. Die Initiatoren kamen aus Deutschland, Frankreich und den Niederlanden, wo es im Bereich der Interferometrie bereits erhebliche Forschungsanstrengungen gegeben hatte und ein entsprechend großes Know-how vorhanden ist. Das MPIA nimmt dabei insofern eine führende Rolle ein, als es Sitz des Deutschen Zentrums für Interferometrie (Frontiers of Interferometry in Germany, FRINGE) ist. In kurzer Zeit haben sich Institute aus 14 europäischen Ländern sowie den beiden Organisationen ESO und ESA der EII angeschlossen. Im September 2004 trafen sich Vertreter aller beteiligten Länder am MPIA in Heidelberg, um ein Memorandum of Understanding zu unterzeichnen. Hier wurde Thomas Henning zum Präsidenten des Wissenschaftsrates gewählt.

Interferometrische Beobachtungen werden zukünftig in der astronomischen Forschung eine bedeutende Rolle spielen – darüber sind sich die Fachleute einig. Die jüngsten Erfolge am VLT-Interferometer, an dem das MPIA mit dem Instrument MIDI einen bedeutenden Anteil hat, und an den beiden Keck-Teleskopen haben dieser Technik großen Aufschwung verliehen. Ab 2007 soll auch das LBT-Interferometer arbeiten (siehe Kap. V.1). Nun gilt es, die Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet in Europa zu bündeln und das Know-how vieler Spezialisten in gemeinsame Projekte zu lenken. Mit Hilfe der EII soll die Interferometrie im sichtbaren und Infrarotbereich als gängige Methode in der beobachtenden Astronomie etabliert werden.

Die EII wurde am 30. Januar 2002 aus der Taufe gehoben, als sich in Heidelberg Vertreter aus Frankreich (JMMC), den Niederlanden (NOVA) und Deutschland (FRINGE) trafen. Von vornherein war es die Absicht, auch andere europäische Gruppen mit einzubeziehen. Die vier Hauptziele der EII sind:

- Unterstützung der Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen europäischen Wissenschaftlern und Instituten.

- Herstellung von Synergien innerhalb Europas, um eine weltweit führende Position zu erlangen.
- Europaweite Ausbildung sowohl von beobachtenden Astronomen als auch von Studenten in der interferometrischen Technik und
- Hinarbeiten auf eine langfristige Vision Europas für die Interferometrie.

Erklärtes Ziel war es zudem, bei der EU-Kommission finanzielle Unterstützung zu erhalten. Dies ist bereits mit zwei Projekten gelungen. Die »Joint Research Activity« JRA4 dient zur Unterstützung von Studien für zukünftige europäische Instrumentierungsprojekte, die »Network Activity« NA5 finanziert Aufenthalte zur Mitarbeit an interferometrischen Projekten.

Um bereits bestehende Strukturen zu nutzen, wurden diese Finanzmittel unter dem Dach von OPTICON beantragt. Im Januar 2004 fand dazu ein Kick-off Meeting in Nizza statt, bei dem die Aktivitäten und Arbeitspakete zu JRA4 und NA5 vorgestellt und koordiniert wurden. Die unter JRA4 begonnenen Arbeiten wurden in zwei Hauptbereiche gegliedert, zum einen in Arbeiten zu allgemein nutzbaren interferometrischen Software-Paketen, und zum anderen in Studien zu neuen interferometrischen Instrumenten der zweiten Generation.

Der nächste Meilenstein wird der gemeinsame ESO/EII-Workshop »The Power of optical/IR Interferometry« sein, der vom 4. bis 8. 4. 2005 in Garching stattfinden wird. Dieses einwöchige Treffen ist zur Hälfte der Wissenschaft gewidmet, zum anderen Teil werden Studien für zukünftige Instrumente am VLTI vorgestellt. ESO will dabei bis zu drei der sieben vorgeschlagenen Projekte als VLTI-Instrumente der zweiten Generation auswählen. Das MPIA ist hier an dem Instrument APRÈS-MIDI beteiligt, einer Erweiterung von MIDI, die es erlauben würde, MIDI durch Kombination von drei oder vier Teleskopen auch als abbildendes Interferometer zu verwenden (siehe Kap. IV.3, MIDI).

(Thomas Henning, Uwe Graser)

V.4 Die ersten Emmy-Noether-Gruppen am Institut

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) fördert in ihrem Emmy-Noether-Programm junge Nachwuchswissenschaftler und will damit promovierten Forschern einen Weg zu früher wissenschaftlicher Selbstständigkeit eröffnen. Das Programm ermöglicht die Gründung einer eigenen Nachwuchsgruppe und soll den Stipendiaten die Befähigung zum Hochschullehrer verleihen. Mit Sebastian Wolf kam im Januar 2004 erstmals ein Teilnehmer des Emmy-Noether-Programms an das MPIA. Hier leitet er eine Gruppe zur Untersuchung von protoplanetaren Scheiben. Seit Dezember 2004 gibt es am Institut auch eine Emmy-Noether-Gruppe, die sich unter der Leitung von Coryn Bailer-Jones mit der Entstehung und den Eigenschaften substellarer Objekte befasst. Wir sprachen mit Sebastian Wolf (SW) über seine bisherigen Erfahrungen.

Abb. V.4: Sebastian Wolf, der Leiter einer Arbeitsgruppe des Emmy-Noether-Programms zur Untersuchung von protoplanetaren Scheiben.



Welche Voraussetzungen muss man mitbringen, um in das Emmy-Noether-Programm aufgenommen zu werden?

SW: Man muss promoviert sein und bereits Auslandserfahrung haben. Das war bei mir der Fall. Ich habe nach meiner Promotion an der Thüringischen Landessternwarte Tautenburg von Februar 2002 bis Dezember 2003 überwiegend am CalTec in Pasadena gearbeitet.

Hatten Sie sich von Anfang an auf das Thema Planetenentstehung konzentriert?

SW: Nein. In Tautenburg habe ich eine Methode entwickelt, mit der sich der Strahlungstransport in beliebigen Staubkonfigurationen dreidimensional besonders leicht und schnell behandeln lässt. Das war also eine numerisch-theoretische Arbeit. Gleichzeitig habe ich aber auch auf La Silla zirkumstellare Scheiben in Doppelsternen beobachtet. Im Rahmen meiner Dissertation habe ich dann mein Modell unter anderem auch auf diese Staubscheiben angewandt und Vorhersagen für die Polarisation des gestreuten Sternlichts gemacht. So konnte ich sowohl in der Theorie als auch in der Beobachtung Erfahrung sammeln.

Woran haben Sie in Pasadena geforscht?

SW: Dort war ich als Postdoc in einem der so genannten Legacy Programs des Weltraum-Infrarotteleskops SPITZER involviert. Es ging darum, die Auswertung von Daten vorzubereiten, die in diesem sehr umfangreichen Beobachtungsprogramm zum Thema Entstehung und Entwicklung von Planetensystemen erwartet wurden – und inzwischen vorliegen. Dort bin ich erst richtig auf das Thema protoplanetare Scheiben aufmerksam geworden.

Wie das? SPITZER ist doch erst im August 2003 gestartet.

SW: Das stimmt. Ich hatte das große Glück, in der Zwischenzeit phantastische Beobachtungsdaten vom Hubble Space Telescope und vom Owens Valley Radio Observatory zu bekommen. Das waren Aufnahmen einer protoplanetaren Scheibe im nahen Infrarot- und im Millimeterbereich. Auf die konnte ich mein Modell hervorragend anwenden und Aussagen zum Staubkornwachstum – als dem ersten Schritt zur Planetenentstehung – in dieser Scheibe ableiten.

Wie kamen Sie dann ins Emmy-Noether-Programm der DFG?

SW: Wenn man als Postdoc arbeitet, muss man sich in das Forschungsprojekt der Gruppe einreihen, in die man gelangt. Für mich war es aber ganz wichtig, meine eigenen Ideen verwirklichen zu können. Und vor allem kann man in einer Gruppe wissenschaftlich viel mehr erreichen denn als Einzelkämpfer.

Wie geht die Anmeldung bei der DFG vor sich, was muss man beachten?

SW: Als Antragsteller muss man sein Forschungsprogramm und sein Ziel sehr genau beschreiben. Und man muss die voraussichtlich benötigten Personal- und Sachkosten abschätzen – Letzteres ist gar nicht so einfach, weil man ja im Vorhinein gar nicht weiß, wie oft man beispielsweise zum Beobachten oder zu einer Konferenz fliegen muss. Außerdem muss man bereits ein Institut ausgewählt und von dort auch eine Zusage bekommen haben. Die hatte ich bereits vom MPIA erhalten.

Können Sie nun im Rahmen des Emmy-Noether-Programms ihre Ideen so gut umsetzen, wie Sie sich das erhofft haben?

SW: Auf jeden Fall! Die Bedingungen sind aus meiner Sicht nahezu ideal. Vier Jahre lang fördert die DFG meine kleine Gruppe, zu der ein Doktorand und ein Postdoc gehören. Der Doktorand Alexander Schegerer arbeitet primär im Bereich der Beobachtungen, und der Postdoc Kacper Kornet ist das starke Rückgrat der Gruppe als Theoretiker. Die DFG bezahlt unsere Gehälter und stellt uns zudem jährlich Sachmittel, beispielsweise für Beobachtungs- und Tagungsreisen, zur Verfügung. Dazu kam die Anschaffung einer Multiprozessor-Workstation.

Eine großzügige Förderung. Wahrscheinlich ist damit für Sie auch ein erheblicher bürokratischer Aufwand verbunden.

SW: Überhaupt nicht. Die Ausgaben für Sachmittel werden bei der DFG beantragt, und die bezahlt problemlos innerhalb des zugesagten Rahmens. Dabei möchte ich übrigens der Verwaltung des MPIA mein großes Lob aussprechen. Sie übernimmt für mich freundlicherweise die Verwaltungsarbeit. Es ist schon von unschätzbarem

Vorteil, wenn man sich auf seine Forschungsarbeit und die der Gruppe konzentrieren kann.

Im Rahmen des Emmy-Noether-Programms soll der Stipendiat auch die »Befähigung zum Hochschullehrer« erlangen, wie es bei der DFG heißt. Wie sieht das bei Ihnen aus?

SW: Ich habe im letzten Semester zum ersten Mal eine Vorlesung gehalten. Das hat mir sehr viel Spaß gemacht. Jedenfalls würde ich später gern als Hochschullehrer arbeiten. Das Emmy-Noether-Programm bietet jungen Leuten – ich bin 31 Jahre alt – wirklich eine gute Möglichkeit auszuprobieren, ob ihnen der Umgang mit den Studenten liegt.

Wollen Sie sich noch habilitieren, oder sehen Sie zum Beispiel in einer Juniorprofessur eine Chance?

SW: Das Emmy-Noether-Programm ist meiner Meinung nach von der Qualifikation her mit einer Juniorprofessur gleichwertig. Ich möchte mich aber gerne noch habilitieren, denn im Zweifelsfall steht man mit Habilitation wohl immer besser da als ohne.

Sie würden demnach Ihren jüngeren Kollegen das Emmy-Noether-Programm empfehlen?

SW: Auf jeden Fall. Das ist wirklich eine ganz tolle Sache. Man wird zum ersten Mal in die Verantwortung für ein eigenes Forschungsprogramm gestellt. Und es ist sehr lehrreich, Verantwortung für Kollegen, also vor allem Doktoranden, zu übernehmen. Aber vor allem bedeutet es eine große Chance, über vier Jahre hinweg ein wissenschaftliches Ziel zu verfolgen, das man sich selbst gesteckt hat.

(Die Fragen stellte Thomas Bührke)

V.5 Ringberg-Workshop über die Struktur und Entwicklung des Milchstraßensystems und seiner Umgebung

Vom 5. bis 9. Dezember trafen sich Astronomen aus aller Welt auf Schloss Ringberg, um ihre Arbeiten über die Struktur und Entwicklung unserer Galaxis und ihrer nahen Nachbarn zu präsentieren und zu diskutieren, wobei das Schloss eine ideale Umgebung sowohl für geplante Vorträge als auch für zwanglose Unterhaltungen bietet. Mehr als 50 Wissenschaftler und Studenten nahmen teil, als Vertreter von Instituten und Universitäten aus ganz Nord- und Südamerika, Europa und Australien. Das Treffen, finanziert vom MPIA und der Max-Planck-Gesellschaft und organisiert von Eva Grebel (jetzt am Astronomischen Institut der Universität Basel) sowie David Martinez-Delgado, bot ein Forum, um die neuesten Entwicklungen – in Beobachtung und Theorie – auf diesem Arbeitsgebiet zu diskutieren.

Das Milchstraßensystem, M 31 (die Andromeda-Galaxie) und ihre Begleitgalaxien spielen eine wesentliche Rolle bei unserem Bemühen, die Entstehung und Entwicklung von Galaxien im gesamten Universum zu verstehen. Ihre Nähe erlaubt uns, sie sehr viel detaillierter zu beobachten als es bei entfernteren Galaxien möglich ist. Somit können wir theoretische Szenarien über-

prüfen, wie jene für die Bildung großer Galaxien durch die Verschmelzung kleinerer Systeme. In den letzten Jahren haben wir eine wahre Explosion an neuen Beobachtungsdaten über die Struktur und Entwicklung unserer Galaxis und anderer, naher Galaxien erlebt. Diese Datenflut verdanken wir größtenteils den neuen astronomischen Weitfeld-Durchmusterungen, wie dem Two-Micron All Sky Survey (2MASS), dem Sloan Digital Sky Survey (SDSS) und dem Radial Velocity Experiment (RAVE), dem Einsatz bereits bestehender (HUBBLE) und neuer Weltraumteleskope (wie dem SPITZER-Infrarotteleskop), sowie den jetzt allgemein zur Verfügung stehenden Teleskopen der 8- bis 10-m-Klasse. Auf diese Weise gewonnene Ergebnisse kamen in den Vorträgen und Diskussionen in Hülle und Fülle vor. Die Zeit war also reif für das Thema dieses Treffens.

Die behandelten wissenschaftlichen Themen begannen mit unserem eigenen Milchstraßensystem. Neueste Modelle zu seiner Entstehung und gegenwärtigen Struktur wurden betrachtet, wie auch Beobachtungshinweise, die diesen Modellen gegenüberstehen. Ein Großteil des Workshops war stellaren Strömen und Strukturen in der galaktischen Scheibe und im Halo gewidmet – Hinweise auf vergangene und noch andauernde Akkretion kleinerer Begleitgalaxien in das Milchstraßensystem. Seit der ersten Entdeckung eines solchen Stroms (Trümmer der mit dem Milchstraßensystem verschmelzenden Sagittarius-Galaxie) vor rund zehn Jahren sind noch einige weitere

Abb. V.5.1: Ken Freeman vom Mount Stromlo Observatory, Australien, und Eva Grebel vom Astronomischen Institut der Universität Basel bei einer angeregten Diskussion in der Pause.





stellare Strukturen gefunden worden, obwohl die wahre Natur einiger dieser Entdeckungen noch immer umstritten ist. Eine der organisierten Diskussionen war einer solchen Kontroverse gewidmet. Es ging darum, ob eine stellare Überdichte, die man in Richtung des Sternbilds Canis Major gemessen hat, eine Begleitgalaxie darstellt, die gerade akkretiert wird, oder ob sie nur ein Anzeichen für eine sich anbahnende Verdrehung der stellaren Scheibe des Milchstraßensystems ist (siehe auch Kap. II.4). Am Ende der Debatte favorisierte eine große Mehrheit der Teilnehmer die Interpretation als Begleitgalaxie.

Dann bewegte sich der Fokus des Workshops nach außen zu den Begleitern des Milchstraßensystems und zu M 31, der unserer eigenen am nächsten gelegenen großen Galaxie. Vorträge über die Geschichte und den gegenwärtigen Zustand der Magellanschen Wolken, der größten Begleiter unserer Galaxis, führten zu einer Diskussion über Anzeichen für frühere Wechselwirkungen zwischen diesen Begleitern und dem Milchstraßensystem selbst, und wie solche Wechselwirkungen die Entwicklung dieser kleineren Systeme beeinflusste. Andere Teilnehmer zeigten, wie sie die kleinsten Begleiter des Milchstraßensystems, kugelförmige Zwerggalaxien, benutzen, um

Abb. V.5.2: Gerry Gilmore vom Institute of Astronomy, Cambridge (UK) und Ken Freeman vom Mount Stromlo Observatory, Australien, im Gespräch. (Photos: Andreas Koch)

die Rolle der Dunklen Materie bei der Entstehung und Entwicklung naher Galaxien in entsprechenden Modellen zu beschreiben. Das Treffen endete mit Vorträgen über die Entwicklung von M 31, die sich – zumindest in ihren äußeren Bereichen – sehr von unserer Galaxis zu unterscheiden scheint. Hatte unsere Galaxis eine ungewöhnliche Geschichte, oder M 31? Oder gibt es vielleicht gar nicht so etwas wie eine »typische« Galaxie? Während bei diesem Workshop viele aufregende Beobachtungsdaten und theoretische Ergebnisse vorgestellt wurden, tauchten auch etliche ebenso spannende Fragen neu auf, die die Richtung zukünftiger Forschung anzeigen. Die Wissenschaftler und Studenten, die an diesem Treffen teilnahmen, fanden, es war eine sehr lehrreiche und ergiebige Erfahrung.

*(Daniel Zucker, David Martínez-Delgado,
Jorge Peñarrubia, David Butler,
Richard D'Souza)*

V.6 Ringberg-Workshop »Vom Staubkorn zum Planeten«

Vom 19. bis 22. Dezember veranstalteten Hubert Klahr und Wolfgang Brandner vom MPIA in der Tagungsstätte der MPG auf Schloss Ringberg einen Workshop zum Thema: Planet Formation – Theory, Observation and Experiment. Trotz der nahen Festtage und eines handfesten Schneesturmes kamen rund 50 Teilnehmer, darunter einige Pioniere der Planetenforschung.

Die Tagungsteilnehmer erwartete eine geradezu märchenhafte Winterlandschaft, die in der Freizeit zu erholsamen Spaziergängen und Skifahrten einlud. Während des Workshops ging es jedoch sehr konzentriert zu. Wie der Titel bereits andeutet, wollten die Veranstalter Fachleute der verschiedenen Disziplinen zusammenführen: Theoretiker, Beobachter und Experimentatoren. Neue Erkenntnisse wurden vorgestellt und offene Fragen diskutiert.

Einer der Pioniere auf dem Gebiet der extrasolaren Planeten, Geoffrey Marcy von der Universität in Berkeley, Kalifornien, berichtete, dass im Rahmen eines groß angelegten Suchprogramms bei insgesamt 1330 Sternen etwa hundert Planeten gefunden wurden. Dieser Anteil von etwa sieben Prozent ist sicherlich nur eine untere Gren-

ze, weil weder kleine Planeten von der Größe der Erde, noch Planeten mit Umlaufzeiten von mehr als etwa zehn Jahren derzeit nachweisbar sind. Marcy schätzt, dass vielleicht jeder fünfte sonnenähnliche Stern von Planeten umgeben ist.

Diese Trabanten sind nicht direkt beobachtbar, weil ihr Zentralstern sie überstrahlt. Fast alle dieser unsichtbaren Begleiter lassen sich nur indirekt über ihre Schwerkraftwirkung auf den Stern nachweisen. Auf diese Weise lassen sich die Umlaufbahnen der Planeten und ihre Mindestmasse bestimmen.

Peter Bodenheimer vom Lick-Observatorium, der sich seit Jahrzehnten mit der Entstehung von Sternen und Planeten befasst, erinnerte an die Ursprünge der heutigen Theorie der Planetenentstehung. So hatten schon Immanuel Kant und Pierre Simon de Laplace im 18. Jahrhundert den richtigen Grundgedanken: Planeten bilden sich in rotierenden Scheiben aus Gas und Staub. Während sich im Mittelpunkt der Scheiben die Materie zu einem Stern verdichtet, klumpt sie sich in den Außenbereichen zu Planeten zusammen. Laplace stellte sich vor, dass die Ursonne von Gaswirbeln umgeben war, aus denen sich die Planeten bildeten. Heute stehen den Astronomen viele Beobachtungsdaten zur Verfügung, die sie nun zu einem widerspruchsfreien Bild zusammenfügen müssen. Dazu bedarf es jedoch noch erheblicher Anstrengungen.

Abb. V.6.1: Rund 50 Astronomen aus aller Welt waren nach Ringberg gekommen, um an dem Workshop über Planetenentstehung teilzunehmen.





Abb. V.6.2: Die Astrophysiker Doug Lin, Ed Thommes und Hubert Klahr am Vortag der Konferenz bei einer Studie über das Wachstum von Eiskristallen als Analogie zur frühen Phasen der Planetenentstehung.

Abb. V.6.3: Zwei Pioniere in Theorie und Beobachtung: Peter Bodenheimer und Geoffrey Marcy (Photo: H. Zinnecker).



Ein Schwerpunkt der Diskussionen betraf die Entstehung großer Planeten, vergleichbar mit den »Gasriesen« Jupiter oder Saturn. Alle bislang gefunden extrasolaren Planeten liegen in einem Massenbereich von etwa einem Zwanzigstel bis zum Siebzehnfachen der Jupitermasse. Gasriesen gehören somit zum normalen »Inventar« eines Planetensystems. Doch ihre Entstehungsgeschichte wirft noch erhebliche Fragen auf.

Nach der gängigen Lehrmeinung entstehen sie in einer protoplanetaren Scheibe aus Gas und Staub. Die festen Partikel stoßen immer wieder zusammen, bleiben aneinander haften und wachsen auf diese Weise. Die immer schwerer werdenden Teilchen sinken nun aufgrund der Schwerkraft zur Mittelebene der Scheibe und bilden dort eine verhältnismäßig dünne Schicht. Da durch diesen Prozess die Staubbichte zugenommen hat, stoßen die Teilchen jetzt öfter zusammen und wachsen weiter bis zu einigen Kilometern Durchmesser an. Diese so genannten Planetesimale ziehen sich mit ihrer Schwerkraft gegenseitig an und lagern sich zu großen Planeten zusammen. Wenn ein solcher Gesteinsplanet etwa zehn Erdmassen erreicht hat, sammelt er aus der Umgebung Gas auf und umgibt sich mit einer Atmosphäre.

Zurzeit lässt sich eigentlich nur die erste Phase, vom Anwachsen der Staubteilchen bis zur Größe von Steinen, durchgehend erklären. Wie in einer zweiten Stufe aus diesen Brocken Planetesimale und daraus dann im dritten Schritt Planeten werden, ist noch längst nicht klar. Bei diesen Größenskalen tritt das Problem auf, dass die Körper heftig miteinander kollidieren. Dann bleiben sie nicht aneinander haften, sondern zerstören sich gegenseitig.

Ein grundsätzlicher, schwieriger Aspekt sind die Zeitskalen. Wie Edward Thommes von der Universität Toronto in seinem Vortrag ausführte, müssen sich die Planeten nämlich in verhältnismäßig kurzer Zeit bilden. Angesichts

dieser Problematik hat Alan Boss von der Carnegie Institution in Washington Mitte der neunziger Jahre das Kant-Laplace-Modell in seiner Urform wieder in die Diskussion eingebracht. Demnach entstehen Planeten, wenn in der Scheibe einzelne Bereiche instabil werden und sich aufgrund der Schwerkraft verdichten. Ein fester Planetenkern könnte entstehen, wenn Staub in das Zentrum eines sich verdichtenden Gasklumpens absinkt. Auf diese Weise könnte sich ein Gasplanet innerhalb weniger tausend Jahre bilden – zumindest theoretisch. Unklar ist allerdings, ob die hierfür notwendigen Bedingungen in einer protoplanetaren Scheibe überhaupt auftreten können. Diese muss nämlich wesentlich massereicher und dichter sein als es bisherige Beobachtungen nahe legen. Außerdem sind diese lokalen Gasverdichtungen zunächst sehr instabil und können in der rotierenden Scheibe leicht zerrissen werden.

Hubert Klahr vom MPIA hat jüngst ein Modell entwickelt, das eine Art Brücke zwischen den beiden konkurrierenden Modellen schlägt. Demnach könnten in einer Scheibe »magnetische Wirbelstürme« entstehen, entfernt mit Hochdrucksystemen in der Erdatmosphäre vergleichbar. Staub würde in diese Wirbel hineinströmen und sich darin ansammeln. Auf diese Weise könnten die »protoplanetaren Hurricanes« als Verstärker der Planetenentstehung funktionieren (siehe Kap. III.2).

Die Vorgänge in einer protoplanetaren Scheibe sind so vielfältig und spielen sich auf einer so weiten Größenskala ab, dass sie sich mit Simulationen allein bei weitem nicht vollständig beschreiben lassen. Astronomische Beobachtungen und seit jüngerer Zeit auch Laborexperimente müssen Fakten liefern, um die Vielfalt der theoretisch denkbaren Szenarien einzuschränken. Auf diesem Gebiet haben die Wissenschaftler erhebliche Fortschritte gemacht.

Wie Thomas Henning und Kees Dullemond berichteten, lassen sich aus der beobachteten Energieverteilung im Infraroten sehr viele Details der protoplanetaren Scheibe ableiten. So ist es beispielsweise möglich, die Ausdehnung der Scheibe zu ermitteln oder Lücken, die ein großer Planet in die Scheibe gerissen haben könnte, nachzuweisen. Mit Hilfe von Infrarotspektren, wie sie seit kurzem das Weltraumteleskop SPITZER liefert, ist es auch möglich, die Signaturen von Wasser-, Kohlenmonoxid- und Kohlendioxid-Eis nachzuweisen, die auf Silikateilchen ausgefroren sind.

Neben Computersimulationen und Teleskopbeobachtungen spielen zunehmend auch Laborexperimente eine Rolle, in denen die Entwicklung von Staubteilchen in protoplanetaren Scheiben nachgestellt wird. Jürgen Blum von der TU Braunschweig untersucht auf diese Weise die Frage, unter welchen Umständen kleine Staubteilchen sich zusammenlagern und zu größeren Aggregaten anwachsen können, und welche Eigenschaften diese Aggregate haben. Experimente in der Schwerelosigkeit, an Bord eines Space Shuttle und als Nutzlast in einer ballistischen Rakete, brachten hier jüngst große Fortschritte.

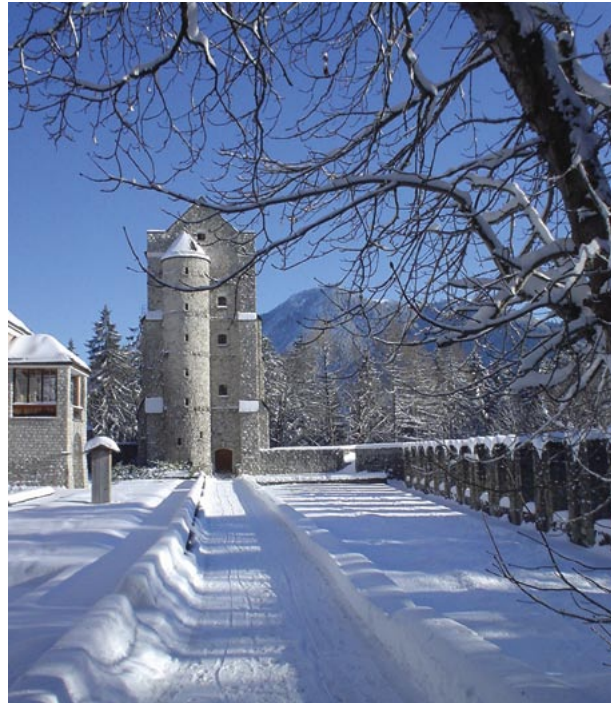


Abb. V.6.4: Starker Schneefall hatte Schloss Ringberg ein malesches Flair verliehen.

So ließ sich verfolgen, wie winzige Partikel bei langsamen Stößen aneinander haften bleiben und langsam zu größeren Partikeln anwachsen.

Trotz großer Fortschritte im Verständnis der Planetenentstehung brennen die Astronomen natürlich darauf, extrasolare Planeten direkt zu beobachten. Wolfgang Brandner berichtete, dass man vom Erdboden aus mit Interferometern, zum Beispiel am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte, ESO, oder am Keck-Observatorium auf Hawaii, innerhalb der nächsten Jahre einige junge, helle Planeten der Jupiterklasse aufspüren könnte. Allerdings bewegen sich die Astronomen bei dieser Aufgabe am Rande des Möglichen. Die besten Chancen wird wohl erst der Nachfolger von HUBBLE, das James-Webb-Weltraumteleskop (JWST), bieten. Dessen Start ist für Mitte 2011 geplant. Mit ihm sollte es möglich sein, Gasriesen im Infraroten direkt zu beobachten. Sowohl am VLTI als auch am JWST sind Astronomen des MPIA beteiligt.

Das Studium protoplanetarer Scheiben wird indes schon früher in eine neue Phase treten, und zwar mit dem Atacama Large Millimeter Array (ALMA). Dieses von der ESO und den Vereinigten Staaten gebaute Array entsteht derzeit auf dem 5000 Meter hohen Berg Chajnantor in den chilenischen Anden. Erste Messungen sollen 2007 beginnen, das gesamte Array mit 64 Radioteleskopen wird 2012 in Betrieb gehen.

(Hubert Klahr, Wolfgang Brandner)

V.7 Erster Studentenworkshop des MPIA auf der Insel Rügen

Vom 3. bis 6. Juni 2004 fand in Losentitz auf Rügen der erste MPIA-Studentenworkshop statt. Das Ziel dieser Veranstaltung war, die Kommunikation zwischen den Studenten zu verbessern: zum einen, den Mitstudenten das eigene Arbeitsthema vorzustellen, und zum anderen, durch gemeinsame Freizeitaktivitäten, wie gesellige Abende, Wandern und Schwimmen, den sozialen Zusammenhalt der Studenten untereinander zu stärken.

Wir waren in einer schönen und freundlichen Ferienanlage unweit der Ostsee in Losentitz untergebracht und nutzten den sonnigen Nachmittag unseres Anreisetages gleich zu einem Badespaziergang. Bei einem amüsanten Grillabend fand dieser Tag einen schönen Abschluss, so dass wir nun für die beiden Arbeitstage (Freitag und Samstag) gewappnet waren.

An beiden Vormittagen standen je drei Vorträge auf dem Programm, wobei sich die Vortragenden zwischen 30 und 45 Minuten Zeit nahmen, ihr Promotionsthema zu erklären und Fragen zu beantworten. Durch die Teilnahme von Studenten aus allen Arbeitsgebieten des MPIA gelang es, viele verschiedene Gebiete der Astronomie zu behandeln. Für Viele von uns war dies sehr lehrreich und ein Blick über den berühmten Tellerrand. Dabei ermöglichte der informelle Rahmen auch detailliertes Nachfragen.

Abb. V.7: Das junge Team vom MPIA vor dem Aufstieg zum Königsstuhl.

Die angeregten Diskussionen wurden nachmittags bei Ausflügen über die Insel fortgesetzt. Am Freitag besuchten wir das Ostseebad Binz und bestiegen den Königsstuhl, den nicht nur die Heidelberger als Hausberg haben. Der Königsstuhl ist eine natürliche Plattform auf einem 118 m hohen Kreidefelsen. Der Sage nach war dieser Felsen bei der Königswahl entscheidend: Wem es gelang, von der Seeseite den Felsen zu erklimmen, der wurde auf einem Stuhl aus Stein zum König gekrönt. Das haben wir nicht ausprobiert... Am Samstag brachte uns unsere Inselrundfahrt bis an das Kap Arkona, die nördlichste Spitze Rügens.

Glücklicherweise stellten sich einige der Studenten als erfahrene Hobby-Köche heraus, die in kurzer Zeit ein leckeres Abendessen für knurrende Mägen zauberten. Gestärkt ging es nun an die abendlichen Vortragsrunden, die sich bis spät in die Nacht erstreckten. Dabei riss auch zu später Stunde das Interesse der Zuhörer nicht ab und manch Vortragender war überrascht, dass der auf 15 Minuten ausgelegte Vortrag weit mehr als eine Stunde füllte.

Am Ende waren sich die Studenten einig: Unser erster Studentenworkshop war ein voller Erfolg – Fortsetzung erwünscht!

(Nadine Häring, Alessandro Berton, Siegfried Falter, Boris Häußler, Bernhard Keil, Stephan Kellner, Jens Rodmann, Marc Schartmann, Oliver Schütz, Konrad Tristram, Stefan Umbreit)



V.8 Ehrungen für Nachwuchswissenschaftler

Im Jahr 2004 wurden sechs Mitarbeiter des Instituts für ihre hervorragenden wissenschaftlichen Leistungen ausgezeichnet. Auf der Jahreshauptversammlung der Max-Planck-Gesellschaft erhielten Daniel-Rolf Harbeck und Sadegh Khochfar die angesehene Otto-Hahn-Medaille für das Jahr 2003. Im Dezember des Jahres wurde zum ersten Mal der Ernst-Patzer-Preis zur Förderung von Nachwuchswissenschaftlern am Max-Planck Institut für Astronomie vergeben. Er ging an Oliver Krause und an Nadine Häring, sowie gemeinsam an Daniel Apai und Ilaria Pascucci.

Otto-Hahn-Medaille

Die Max-Planck-Gesellschaft zeichnet seit 1978 jedes Jahr bis zu 40 junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler für herausragende Leistungen mit der Otto-Hahn-Medaille aus. Sie ist mit einem Anerkennungsbetrag und mit der Möglichkeit eines einjährigen Forschungsaufenthaltes im Ausland verbunden. Durch die Preisverleihung und den Auslandsaufenthalt sollen besonders begabte Nachwuchswissenschaftler zu einer späteren Hochschul- und Forscherkarriere motiviert werden. Die Auszeichnung wird jeweils während der Hauptversammlung im folgenden Jahr verliehen.

Daniel-Rolf Harbeck erhielt die Otto-Hahn-Medaille für den Nachweis, dass chemische Selbstanreicherung auch in Kugelsternhaufen stattfindet. Rund 50 Jahre lang galten Kugelsternhaufen als einfache Sternsysteme. Nach dieser Lehrmeinung sind sie »aus einem Guss« entstanden, so dass ihre Sterne chemisch homogen sein sollten. Bekannte Häufigkeitsvariationen chemischer Elemente in massereichen Mitgliedern dieser Haufen erklärte man durch interne Kernprozesse.

Mit Hilfe neuer Beobachtungsdaten konnte Harbeck jedoch zeigen, dass chemische Inhomogenitäten auch in massearmen Sternen vorkommen, bei denen eine interne Anreicherung nicht möglich ist. Daraus zog er den Schluss, dass sich auch in Kugelsternhaufen die Phase der Sternentstehung über einen längeren Zeitraum hinzog. Dieser Zeitraum muss so lange gedauert haben, dass die ersten Supernovae in den Kugelsternhaufen explodierten und das interstellare Gas mit schweren Elementen anreicherten, noch bevor alle anderen Sterne entstanden waren. Ähnliche chemische Inhomogenitäten konnte er auch in so genannten kugelförmigen Zwerggalaxien nachweisen, die man bis dahin als ähnlich einfach eingestuft hatte wie die Kugelsternhaufen. Nach diesen neuen Erkenntnissen gibt es also diese einfach aufgebauten Sternsysteme gar nicht.



Abb. V.8.1: MPG-Vizepräsident Kurt Mehlhorn überreicht Daniel-Rolf Harbeck (*oben*) und Sadegh Khochfar (*unten*) die Otto-Hahn-Medaille.



Sadegh Khochfar erhielt die Otto-Hahn-Medaille für seine Arbeiten zur Entstehungsgeschichte von Elliptischen Galaxien im kosmologischen Kontext. Seit einiger Zeit nahmen die Kosmologen an, dass die massereichen Elliptischen Galaxien durch das Verschmelzen von zwei Spiralgalaxien entstanden sind. Diese relativ neue Vermutung wurde mit Hilfe von Computersimulationen detailliert untersucht und immer genauer überprüft. Die Verschmelzungsprodukte in den Simulationen entsprachen jedoch häufig nicht den beobachteten Eigenschaften von Elliptischen Galaxien. Khochfar hat detaillierte Modelle entwickelt, mit denen sich vorhersagen lässt, welche Vorgänger beim Verschmelzen zu den massereichsten Elliptischen Galaxien führen. Demnach sind dies wiederum Elliptische Galaxien, nicht Spiralgalaxien.



Abb. V.8.2: Die Preisträger des Ernst-Patzer-Preises (von links nach rechts) Oliver Krause, Nadine Häring, Daniel Apai und Ilaria Pascucci.

Ernst-Patzer-Preis

Der Ernst-Patzer-Preis zur Förderung von Nachwuchswissenschaftlern finanziert sich aus der Wissenschaftlichen Ernst-Patzer-Stiftung, welche die Witwe des Philosophen und Kunstliebhabers Ernst Patzer eingerichtet hat. Diese Stiftung hat sich zum Ziel gesetzt, Wissenschaft und Forschung vornehmlich auf dem Gebiet der Astronomie finanziell zu fördern und zu unterstützen. Sie vergibt ihre Förderpreise an junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg. Ausgezeichnet werden die besten referierten Veröffentlichungen eines Nachwuchswissenschaftlers bzw. einer Nachwuchswissenschaftlerin während der Promotions- und/oder der Postdoc-Phase am MPIA. Die Begutachtung der eingereichten Vorschläge erfolgt durch ein eigens hierfür eingesetztes Auswahlgremium, das sich aus zwei Wissenschaftler des MPIA sowie einem externen Wissenschaftler zusammensetzt. Oliver Krause erhielt ein Preisgeld von 2000 Euro, die drei anderen Preisträger jeweils 1000 Euro.

Oliver Krause wurde für seine Arbeit über den kalten Staub in Richtung des Supernova-Überrests Cas A ausgezeichnet (siehe Kap. II.3). Diese Arbeit wurde übereinstimmend als die herausragende Publikation eines Nachwuchswissenschaftlers am MPIA im betrachteten Zeitraum gewertet. In seiner Arbeit widerlegt Oliver Krause unter Verwendung gut ausgewählter Beobachtungsdaten die von anderen Autoren aufgestellte These, dass die Supernova Cas A große Mengen an interstellarem Staub produziert hat. Dies stellt eine jüngst aufgebrachte Hypothese in Frage, wonach Supernovae die Hauptquellen von schweren Elementen und interstellarem Staub im frühen Universum waren. Die Arbeit zeichnet sich insbesondere dadurch aus,

dass ein wichtiges astrophysikalisches Problem erkannt, systematisch und kritisch hinterfragt und schließlich gelöst wurde.

Nadine Häring wurde für ihre Arbeit über den Zusammenhang zwischen den Massen zentraler Schwarzer Löcher in Galaxien und dem umgebenden stellaren »Bauch« (engl. Bulge) geehrt. Sie gilt als die beste auf einer Diplomarbeit beruhende Publikation des Instituts. Nadine Häring zeigte darin unter Verwendung neuer Daten vom Weltraumteleskop HUBBLE, dass die Beziehung zwischen der Masse stellarer Bulges und zentralen Schwarzen Löchern in Galaxien wesentlich enger und eindeutiger ist als bislang angenommen. Die Anwendung dieser Beziehung auf leuchtkraftschwache und weit entfernte Galaxien wird es ermöglichen, die Massen zentraler Schwarzer Löcher in Galaxien des frühen Universums einfacher und genauer als bisher zu bestimmen.

Daniel Apai und *Ilaria Pascucci* erhielten den Ernst-Patzer-Preis für ihre Arbeit über die Beobachtung des Sterns TW Hydrae mit Hilfe einer neuen Technik, genannt polarimetrische differentielle Abbildung (Polarimetric Differential Imaging, siehe Jahresbericht 2003, S. 27). Sie nutzten hierfür die am MPIA gebaute Kamera NACO am VLT. In ihrer Arbeit zeigen Daniel Apai und Ilaria Pascucci das Potential dieser neuartigen Beobachtungsmethode auf, die es ermöglicht, die Eigenschaften zirkumstellarer Scheiben mit bisher unerreichter räumlicher Auflösung zu studieren. Sie wandten die Methode auf die zirkumstellare Scheibe des der Sonne am nächsten gelegenen jungen Sterns TW Hydrae an. Dabei fanden sie heraus, dass ein Loch im Zentralbereich der Scheibe kleiner sein muss als aufgrund von Modellrechnungen anderer Autoren bisher angenommen. Möglicherweise ist dieses Loch mit der Entstehung von Planeten verbunden. Die Arbeit beeindruckt vor allem durch die detaillierte und kritische Darstellung der Auswertung und Interpretation dieser neuartigen Messdaten. Sie wird andere Wissenschaftler dazu anregen, diese Beobachtungsmethode auf andere Objekte und wissenschaftliche Fragestellungen anzuwenden.

V.9 Venus-Transit über dem Schwetzingener Schlossgarten

Am 8. Juni konnten die Menschen in Europa sowie in weiten Teilen Asiens und Afrikas ein seltenes Himmelschauspiel verfolgen: einen Durchgang (Transit) der Venus vor der Sonne. Zum ersten Mal seit 1882 trat ein solches Ereignis wieder ein. Während die Profiastronomen hiervon wenig Notiz nahmen, fand das Schauspiel bei der Öffentlichkeit große Aufmerksamkeit. Mehrere Heidelberger Institutionen, darunter auch das MPIA, hatten die Bevölkerung zu einem Besuch in den Schwetzingener Schlossgarten eingeladen. Einige tausend Besucher, darunter 16 Schulklassen, strömten in die malerische Anlage und verfolgten das Ereignis bei Volksfeststimmung und wolkenfreiem Himmel.

Frühes Kommen war allerdings angesagt, wenn man den gesamten Transit erleben wollte. Schon Um 7:20 Uhr berührte die schwarz erscheinende Venusscheibe außen den Sonnenrand und war um 7:39 Uhr ganz eingetreten.

Abb. V.9.1: Vor historischer Kulisse fanden sich tausende von Besuchern ein, um den Venustransit zu verfolgen.

Dann wanderte sie vor dem Sonnenball entlang, berührte um 13:04 Uhr den anderen Rand und trat um 13:23 Uhr aus der Sonnenscheibe aus.

Für die Besucher gab es eine Vielzahl von Möglichkeiten, den Transit zu beobachten. Mitarbeiter des MPIA und viele andere Privatpersonen hatten Teleskope mitgebracht, Projektionsschirme wurden aufgestellt, und in der Orangerie des Schlosses wurden Live-Bilder von Observatorien in aller Welt aus dem Internet auf eine Leinwand projiziert. Und farbige Poster informierten über die historischen und astronomischen Hintergründe des Ereignisses. Auch das Fernsehen war gekommen: Das ZDF berichtete in seinen Morgen- und Mittagsmagazinen live aus dem Schlossgarten.

In der Orangerie des Schlosses hatte das Mannheimer Landesmuseum für Arbeit und Technik historische Instrumente und Dokumente aus der Zeit des Astronomen und Jesuitenpaters Christian Mayers ausgestellt. Den Ort hatten die Veranstalter nämlich nicht von ungefähr ausgewählt. Am 6. Juni 1761 hatte an selber Stelle Mayer gemeinsam mit dem Kurfürsten Carl Theodor den damaligen Venustransit beobachtet. Danach wurde der Astro-



nom mit der Errichtung einer Sternwarte beauftragt. Das zunächst auf dem Dach des Schlosses eingerichtete Observatorium markierte den Beginn der astronomischen Forschung in der Kurpfalz und führte letztlich zur Gründung der Landessternwarte auf dem Königstuhl, und ihres Nachbarinstituts, des MPIA.

Die gelungene Veranstaltung zeigte einmal mehr die Begeisterungsfähigkeit der Bevölkerung für die Astronomie. Offenbar müssen es nicht immer Schwarze Löcher sein! Ein schwarzer Punkt vor der Sonnenscheibe tut es auch...

*(Veranstalter:
Verwaltung des Schlossgartens Schwetzingen,
MPIA, Landessternwarte Heidelberg,
die Redaktionen von Sterne und Weltraum,
Spektrum der Wissenschaft und Astronomie heute,
Landesmuseum für Arbeit und Technik
sowie das Heidelberger Explo)*



Abb. V.9.2: (unten) Besonders Kinder und Jugendliche erfreuten sich an der Beobachtung des Himmelsschauspiels.

Abb. V.9.3: (oben) Poster in der Orangerie informierten über die historischen und astronomischen Hintergründe.



V.10 Erinnerungen an das Institut und an Deutschland.

Ein Gespräch mit Steven Beckwith

Steven Beckwith war von 1991 bis 1998 Direktor am MPIA. Anschließend wechselte er nach Baltimore, wo er die Leitung des renommierten Space Telescope Science Institute (STScI) übernahm. Beckwith blieb dem MPIA jedoch stets verbunden, zum einen als Auswärtiges Wissenschaftliches Mitglied und zum anderen durch gemeinsame Projekte, wie GEMS. Wir fragten Beckwith nach seinen beruflichen und privaten Erfahrungen in Deutschland, nach seinen eigenen weiteren Plänen und nach der Zukunft des Weltraumteleskops HUBBLE.

Was hat Sie damals an der Stelle als Direktor des MPIA gereizt?

SB: Als ich 1990 das Angebot in Betracht zog, schien das MPIA gut mit Mitteln ausgestattet; insbesondere hatte es ein Observatorium in Südspanien und sehr viel Flexibilität bei der Verwendung seiner Geldmittel für die Wissenschaft. Doch mir fiel auf, dass man noch sehr viel mehr tun könnte. Daher sah ich große Möglichkeiten, neuartige Wissenschaft zu betreiben, indem man einige strategische Entscheidungen über die Art und Weise fällte, wie die Mittel am besten zu verwenden wären.

Damals entwickelte sich mein Arbeitsgebiet, die Infrarotastronomie, ungemein schnell, und die Technologie, die nötig war, um konkurrenzfähige Instrumente zu bauen, wurde immer teurer. Für mich als Professor am Cornell war es schwer, die nötig Unterstützung für den Bau der nächsten Generation konkurrenzfähiger astronomischer Instrumente zu erhalten. Der Etat des MPIA erlaubte dies jedoch ganz klar, und damit würde es möglich, Wissenschaft an vorderster Front zu betreiben – das war für mich das wirklich Attraktive.

Hat sich Ihr Job so entwickelt, wie Sie ihn sich vorgestellt hatten?

SB: Zum größten Teil haben die Dinge, die ich vorfand, meine Erwartungen erfüllt, und die MPG hat mich in überragender Weise in meiner Arbeit unterstützt. Ohne diese Unterstützung hätte ich nicht viel erreichen können. Natürlich war es schwer, die kulturellen Herausforderungen vorherzusehen, die auftauchen, wenn man in ein anderes Land geht, besonders als Direktor. Ich weiß, ich habe anfangs viele Fehler gemacht, als ich an Bord kam, einfach weil ich mich nicht in die Arbeitsweise der Menschen einfühlen konnte und nicht erkannte, wie man am besten etwas erreicht. Doch letztendlich haben mir die Mitarbeiter des Instituts meine Fehler verziehen, und ich habe beharrlich am Erreichen meiner Ziele weiter gearbeitet. Die Stelle entwickelte sich recht gut. Ich war sehr zufrieden mit meiner Entscheidung, nach Heidelberg zu gehen und mit den Mitarbeitern des MPIA zusammenzuarbeiten.

Was fanden Sie am MPIA besonders positiv?

SB: Die Infrastruktur, die Professor Elsässer aufgebaut hatte, eignete sich hervorragend für die Herstellung wissenschaftlicher Instrumente. Die Maschinenwerkstatt war auf dem neuesten Stand der Technik, und wir haben ihre Möglichkeiten sogar noch verbessert. Die Mitarbeiter waren sehr geschickt. Wir konnten fast alles, was wir wollten, im eigenen Haus herstellen, rasch Entscheidungen fällen und flexibel auf Veränderungen in der Wissenschaft reagieren. Es gab eine Reihe sehr erfahrener, guter Wissenschaftler mit zukunftsorientierten Projekten, die ich unterstützen und in einigen Fällen noch erweitern konnte, und ich hatte das Gefühl, dass viele den Wunsch hatten, das Leistungsniveau des Instituts noch mehr zu steigern. Es war Potenzial für Verbesserungen und Potenzial für Veränderungen vorhanden, und das gab mir die Gelegenheit, einige neue Ideen auszuprobieren.

Was hat Ihnen nicht so gut gefallen?

SB: Die Rechner-Infrastruktur benötigte eine Menge an Investitionen und Unterstützung. Uns fehlten eine Reihe kritischer Komponenten, um sie wirklich konkurrenzfähig für wissenschaftliche Forschung zu machen. An erster Stelle stand dabei der Anschluss an das Internet, aber wir benötigten auch mehr moderne CPUs und Software, die von den meisten Astronomen verwendet wurde. Wieder einmal hat uns hier die Max-Planck-Gesellschaft in hervorragender Weise bei der Verbesserung der Systeme unterstützt. Wir kauften zahlreiche Sun-Microsystems-Computer, schlossen sie an das Internet an und investierten stark in die Ausrüstung der einzelnen Astronomen. Letztendlich haben wir eines der besten Systeme für astronomische Forschung in der Welt aufgebaut. Dies war ein weiteres Gebiet, auf dem die Max-Planck-Gesellschaft ungemein hilfreich war. Sie war sehr offen für meine Bitten nach mehr Investitionen. Obwohl es sie Geld kostete, erkannte die MPG, dass meine Vision nicht durchführbar war, wenn ich nicht ihre Unterstützung erhielt, und dafür war ich ungemein dankbar.

Ich war auch der Meinung, dass wir bei unseren Investitionen in die Instrumentierung des Calar Alto nicht immer die richtigen strategischen Entscheidungen getroffen hatten. Calar Alto hatte gute Teleskope, aber es war nicht der beste Standort für Astronomie auf der Welt. Das Wetter war oft wolkeig, und die raschen Temperaturänderungen bedeuteten, dass die großen Teleskope Zeit brauchten, sich nach dem Durchzug einer Front anzupassen. Daher war das Seeing, das eigentlich recht gut ist auf dem Calar Alto, nach dem Durchzug einer Front oft sehr schlecht. Die Instrumentierung kopierte klassische Instrumente, die denen anderer Observatorien an besseren Standorten ähnlich wa-

ren, wodurch wir keinerlei Vorteile hatten. Ich verlagerte den Schwerpunkt dahingehend, sehr viel schneller als andere Observatorien modernste Instrumente zu bauen. Somit verringerten wir unseren Wetter-Nachteil durch den Vorteil, neue Technologien rasch ans Teleskop zu bringen, und natürlich war das MPIA der perfekte Ort, das zu erreichen.

Welche Ziele hatten Sie, als Sie die Leitung des MPIA übernommen haben?

SB: Das Hauptziel war, Wissenschaft an vorderster Front zu betreiben. Das war der Grund, warum ich dort war. Wenn ich auf jene Zeit zurückblicke, glaube ich, dass unter den zahlreichen Projekten, die im Gange waren und die ich übernehmen oder leiten sollte, einige meiner Meinung nach sehr gut waren, wie das CONICA-Projekt; bei einigen anderen hatte ich dagegen das Gefühl, dass sie wahrscheinlich keine sinnvolle Wissenschaft hervorbringen würden. Ich brauchte ein paar Jahre, um die genaue Mischung der Dinge, die wir tun mussten, herauszusuchen und natürlich auch, um mich um die Menschen zu kümmern, die an diesen Projekten beteiligt waren. Letztendlich haben wir eine Lösung gefunden.

Haben Sie diese Ziele erreicht?

Insgesamt gesehen, glaube ich, dass das MPIA alle Ziele erreicht hat, die ich mir erhofft hatte, als ich ans Institut kam. Eine Reihe dieser Ziele wurde jedoch erst verwirklicht, als ich schon weg war. In der modernen astronomischen Forschung ist es so, dass Projekte oft viele Jahre dauern, ehe sie abgeschlossen sind. Einige der Projekte, die ich vor meinem Weggang mit auf den Weg gebracht habe, wie z.B. das MIDI-Projekt für das VLT, die Weitfeld-Kamera, die Klaus Meisenheimer für das 2.2-m-Teleskop in Chile gebaut hat, und das LBT, zählen meiner Meinung nach zu den besten Leistungen des MPIA während meiner Amtszeit als Direktor. Diese Projekte beginnen jetzt gerade Früchte zu tragen. Es freut mich sehr, zurück zu kommen und die Aufregung zu erleben, die Christoph Leinert mit MIDI und Klaus Meisenheimer und seine Kollegen mit der Weitfeld-Kamera ausgelöst haben. Das Projekt GEMS (Galaxy Evolution from Morphology and Spectral energy distributions) wurde von Hans-Walter Rix begonnen, wobei er Ergebnisse nutzte, die mit dieser Kamera gewonnen worden waren. GEMS ist ein Beispiel für die Ziele, die ich für das MPIA hatte, und ich war begeistert zu sehen, wie gut sich alles für Hans-Walter und die anderen Mitarbeiter entwickelt hat.

Was sind die bedeutendsten Unterschiede in der Leitung des MPIA und des STScI?

SB: Der auffälligste Unterschied ist der, dass das MPIA ein unabhängiges Institut ist, dessen Hauptziel darin besteht, wissenschaftliche Forschung hervorzubringen, hauptsächlich durch seine eigenen Mitarbeiter und Direktoren. Das STScI ist ein Dienstleistungsinstitut, dessen Hauptziel darin besteht, Wissenschaft hervorzubrin-

gen, indem es eine große Gemeinde von Astronomen unterstützt, von denen nur sehr wenige am Institut selbst arbeiten. Das bedeutet, dass das MPIA eine sehr viel größere Flexibilität besitzt als das STScI. Am MPIA konnten wir selbständig Entscheidungen treffen und sie sehr rasch umsetzen. Es bestand weniger Notwendigkeit, jede einzelne unserer Entscheidungen mit einer größeren Gemeinschaft abzustimmen, bevor man fortfahren konnte.

Die Leitung des STScI verbindet Management und Politik, und es ist der politische Teil des Jobs, der am schwierigsten ist. Am STScI müssen wir oft zwischen Optionen wählen, von denen jede viele Menschen unzufrieden machen wird, und wir haben kaum Kontrolle über die nachfolgenden Konsequenzen. Am MPIA war die Situation eine andere, und das hieß, dass wir ganz anders an Entscheidungen herangingen, als wir es hier in Baltimore tun.

Haben Sie den Kontakt zu den Kollegen am MPIA gehalten? Gibt es gemeinsame Projekte?

SB: Ja. Ich stehe nach wie vor in engem Kontakt mit meinen Kollegen am MPIA, und ich bemühe mich, mindestens zweimal im Jahr zu Besuch nach Deutschland zu kommen, um diese Kontakte am Leben zu halten. Ich bin Auswärtiges Mitglied am Institut, und ich nutze das aus, soweit mir mein Job in Baltimore das erlaubt. Ich freue mich immer ungemein, nach Heidelberg zurückzukehren und mit den Leuten, die ich dort kannte, zu reden, mit den früheren Kollegen wie auch mit den vielen neuen Wissenschaftlern, die ans Institut gekommen sind, seit Hans-Walter Rix und Thomas Henning Kodirektoren wurden. Heidelberg ist gerade jetzt ein anregender und lebendiger Ort für die Wissenschaft.

Das wichtigste Gemeinschaftsprojekt, das wir haben, ist das GEMS-Konsortium. Ich bin Mitglied dieses Teams. Es nutzt Beobachtungen, die mit der Weitfeld-Kamera am 2.2-m-Teleskop gemacht wurden, um HUBBLE-Bilder von einem $1/2$ Grad großen Feld aufzunehmen, das im Rahmen von COMBO-17 untersucht wurde. Dieses Projekt ist eines der produktivsten gewesen, an dem ich je beteiligt war. Es ist ein wunderbare Art, wissenschaftlichen Kontakt zu halten. Die Treffen finden abwechselnd in Heidelberg und Baltimore, und manchmal auch anderen Orten statt, und ich hoffe sehr, dass dieses Projekt noch einige Jahre weitergeht.

Zwei persönliche Fragen. Hatte Ihre Familie Probleme, sich in Deutschland einzufinden?

SB: Wir hatten einige Probleme. Mit einigen davon hatten wir gerechnet, mit anderen nicht. Unsere Kinder waren noch klein, als wir nach Heidelberg kamen, vier bzw. fünf Jahre alt. Wir haben sie sofort in den deutschen Kindergarten gegeben. Wir hatten erwartet, dass die Kleinen schnell Deutsch lernen und auch gesellschaftlich integriert würden. Doch nachdem beide Kinder zwei Jahre lang auf deutsche Schulen gingen, stellten wir fest, dass sie sich nicht gut einfügten. Meiner Tochter gelang dies sehr viel besser als meinem Sohn, der die erste Klasse

der Grundschule in Dilsberg besuchte. Mein Sohn weigerte sich, Deutsch zu lernen und isolierte sich sehr im Klassenzimmer. Die Lehrer empfahlen uns, ihn auf eine englischsprachige Schule zu schicken, und es war dann einfach praktischer, unsere beiden Kinder in dieselbe Schule zu schicken. Also das war ein Problem, das wir nicht erwartet hatten.

Meine Frau hat viele Jahre lang Deutsch in der Schule gelernt und spricht fließend Deutsch. Sie besuchte die Universität Würzburg und versteht die Kultur gut. Sie hatte jedoch Schwierigkeiten, eine dauerhafte Arbeitsgenehmigung zu bekommen. Selbst nachdem wir sieben Jahre hier waren, konnte sie nicht den für eine dauerhafte Beschäftigung nötigen Status erlangen. Sie hatte zwar fast die ganze Zeit eine Anstellung, zuerst bei IBM und später bei SAP, doch hin und wieder zwang die deutsche Regierung diese Firmen, ihre Stelle auszuschreiben und nach qualifizierten deutschen Staatsbürgern zu suchen, die die Arbeit machen sollten, die sie machte. Das war für uns psychologisch sehr schwierig. Meine Frau wurde normalerweise nicht über diese Anzeigen informiert und sah sie erst, wenn sie in den Zeitungen erschienen. Am Ende hatten wir das Gefühl, dass es uns sehr schwer fallen würde, unter dieser Art von Druck in Deutschland glücklich zu bleiben. Im Vergleich zu mir war sie nur ein Bürger zweiter Klasse.

Sind Deutsche Ausländern gegenüber unfreundlicher oder weniger hilfsbereit als Amerikaner?

SB: Ich kann nicht sagen, dass Deutsche mehr oder weniger freundlich zu Ausländern sind als Amerikaner, weil ich nur Erfahrung als Ausländer in einem Land habe. Ich glaube, es ist für jeden schwer, in ein anderes Land zu gehen. Es gibt keinen Grund zu erwarten, dass sich die Kulturen ändern, um Menschen von außen aufzunehmen. Die Arbeitsregelungen in Deutschland waren sicher ein Problem für uns. Viele Frauen aus Amerika erwarten heute, die gleichen vollen Beschäftigungsmöglichkeiten wie Männer zu haben, etwas, das früher nicht so war. In dieser Beziehung ist Deutschland noch rückständig. Es gibt nicht genügend Kinderbetreuungseinrichtungen für Familien mit berufstätigen Eltern. Die Regelungen für Büro- und Ladenöffnungszeiten machen es sehr schwer für Familien mit Kindern, die Schwierigkeiten des Alltags zu bewältigen. Zweifellos ist die Gesellschaft in Deutschland auf eine Familie ausgerichtet, in der der eine Ehegatte, am ehesten der Mann, zur Arbeit geht und der andere, am ehesten die Frau, zu Hause bleibt und sich um die Kinder kümmert. Ich glaube, dies ist für jemanden aus den USA die größte Schwierigkeit, mit der er fertig werden muss. Andererseits weiß ich sehr wohl von vielen ausländischen Kollegen, die hierher in die USA kommen, dass sie auch in Amerika auf Schwierigkeiten stoßen, einfach weil die Kultur eine ganz andere ist als ihre eigene. Sie finden vielleicht nicht die Nahrungsmittel, die sie mögen, haben Probleme mit den Verkehrsregeln, der Sprache und vielen anderen Dingen. Die amerikanische



Abb. V.10: Steven Beckwith im MPIA

Bürokratie ist bekanntermaßen schwierig für Ausländer, insbesondere nach dem 11. September. In ein anderes Land zu kommen, setzt Familien und Einzelpersonen großen Belastungen aus, und es wird nicht immer leicht für sie sein, sich in die Gesellschaft einzufügen.

Sie werden die Leitung des STScI demnächst abgeben. Haben Sie bereits eine Nachfolgeposition in Aussicht?

SB: Ich werde im September vom Posten des Direktors zurücktreten, aber ich werde dem Mitarbeiterstab des Instituts weiter als Astronom angehören. Ich plane, mich in dem Jahr nach meinem Rücktritt auf ein schriftstellerisches Projekt zu konzentrieren. Danach werden wir sehen.

Eine letzte Frage zum HST: Wie schätzen Sie die Chance für eine letzte Service Mission ein (entweder robotisch oder mit dem Shuttle)?

SB: Ich persönlich bin sehr optimistisch, dass HUBBLE gewartet werden wird, und ich hoffe, dass dies geschieht. Die Raumfähre bietet die größte Chance auf einen Erfolg der Mission und insgesamt die geringsten Kosten für die NASA. Sean O'Keefe, der ursprünglich entschieden hatte, die Wartungsmission zu streichen, hat die Agentur verlassen. Der designierte neue Chef, Mike Griffin, hat privat seine Bewunderung für HUBBLE ausgedrückt und dass er den Einsatz der Raumfähre zur Wartung von HUBBLE bevorzugen würde. Meine Hoffnung ist, dass wir, wenn Griffin an Bord kommt, eine Chance haben werden, den Wert einer HUBBLE-Wartung noch mal zu überdenken, und dass er zu dem Schluss kommen wird, dass sie den einen Raumflug noch wert ist.

Personal

Heidelberg

Direktoren: Henning (GF), Rix

Wissenschaftliche Mitarbeiter: Andersen, D. (bis 5. 10.), Barden, Bell, Bönnhardt (bis 31. 3.), Brandner, Butler (ab 1. 6.), Cannon (ab 1. 9.), Dannerbauer (ab 1. 6.), Debieu, Dullemont (ab 1. 10.), Feldt, Fendt (ab 1. 11.), Fried, Gässler, Graser, Herbst, Hetznecker, Hippelein, Hippler, Hofferbert, Huisken, Kiss (bis 31. 8.), Klaas, Klahr, Kleinheinrich, Kniazev (bis 30. 9.), Köhler, Kornet (ab 1. 7.), Krasnokutski, Krause (bis 24. 3.), Kürster (ab 1. 4.), Kuhlmann (ab 1. 12.), Launhardt, Leinert, Lemke, Lenzen, Ligori, Marien, Mathar (bis 31. 1.), Meisenheimer, Mundt, Przygodda (ab 1. 3.) Pitz, Röser, Rouillé, (bis 30. 6.), Schinnerer (ab 1. 8.), Schreiber (ab 1. 6.), Setiawan, Staude, Steinacker, Stickel, Toth (bis 31. 1.), Vavrek (bis 31. 3.), Walter (ab 1. 8.), Weiß (bis 29. 2.), Wolf R. (Freistellung Altersteilzeit ab 15. 11.), Wolf S., Xu (bis 29. 2.)

Doktoranden: Andersen, M. (bis 30. 6.), Apai (bis 30. 6.), Berton, Bertschik (bis 29. 2.), Birkmann, Borch (bis 29.2.), Büchler De Matos Costa (bis 30. 9.), Chen (ab 1. 9.), Debieu (ab 1. 2.), Dib, Dziourkevitch (ab 1. 11.), Dumitrache (23. 2. bis 23. 3.), D'Souza (ab 1. 10.), Egner, Falterer, Györyova (ab 1. 4.), Hanke (ab 1. 10.), Häring, Häußler, Hempel (bis 31. 10.), Johansen (ab 1. 8.), Keil, Kellner, Kovacs, Krmpotic, Linz (ab 1. 5.), Pascucci (bis 30. 6.), Peter (ab 1. 1.), Puga, Quanz (ab 1. 5.), Ratzka, Riechers (ab 1. 6.), Rodler (ab 1. 11.), Rodmann, Schartmann, Schegerer (ab 1. 6.), Schütz, Semenov, Smolicic (ab 7. 10.), Stegmaier (ab 15. 11.), Stumpf (ab 15. 10.), Sukhorukov (15. 4. bis 31. 7.), Tristram (ab 1. 2.), Umbreit, Voigt (1. 11. bis 31. 12.), Walcher (bis 31.10.)

Diplomanden und studentische Hilfskräfte: D'Souza (bis 30. 9.), Geißler (ab 1. 10.), Mertin (bis 15. 9.), Rockenfeller (ab 1. 7.), Schmidt (ab 1.12.), Stumpf (bis 31. 8.), Weise (ab 1. 11.)

Diplomanden/Master Studenten (FH): Boxermann (1. 3. bis 30. 9.), Herberich (1. 3. bis 31. 8.), Würtele (bis 30. 6.)

Wissenschaftliche Dienste: Bizenberger, Grözingen, Hinrichs (bis 31. 5.), Laun, Leibold (ab 1. 7.), Naranjo, Neumann, Quetz, Schmelmer

Rechner, Datenverarbeitung: Briegel, Hiller, Rauh, Richter, Storz, Tremmel, Zimmermann,

Elektronik: Alter, Becker, Ehret, Grimm, Klein, Mall, Mohr, Ramos, Ridinger, Salm, Unser (bis 31. 3.), Wagner, Westermann, Wrhel

Feinwerktechnik: Böhm, Heitz, Meister, Meixner, Morr, Pihale, Sauer

Konstruktion: Baumeister, Ebert, Münch, Rohloff, Rosenberger (ab 1. 8.)

Fotolabor: Anders-Öczcan

Grafikabteilung: Meißner-Dorn, Weckauf

Bibliothek: Dueck, Fehr (15. 2. bis 30.11.)

Verwaltung: Apfel, Gieser, Heißler, Hölscher, Kellermann, Papousado, Schleich, Voss, Zähringer

Sekretariat: Bohm, Janssen-Bennynck, Koltes-Al-Zoubi, Seifert

Technischer Dienst und Kantine: Behnke, Herz, Jung, Lang, Nauß, B. Witzel, F. Witzel, Zergiebel

Auszubildende: Baungärtner, Euler (ab 1.9.), Gärtner (ab 1.9.), Maurer, Müllerthann, Resnikschek; Rosenberger, Sauer, Schewtschenko (ab 1. 9.), Schmitt (ab 1.9.), Stadler

Freie Mitarbeiter: Dr. Th. Bürcke

Stipendiaten: Afonso (ab 1. 6.), Alvarez, Apai (1. 7. bis 31. 8.), Bailer-Jones (bis 30. 9.), Bouwman (1.9.), Butler (bis 23. 4.), Chesneau (bis 31. 10.), De Bonis (ab 1. 2.), Farinato (ab 15.2.), Goldmann (ab 1. 8.), Gouliermis (ab 1.5.), Goto (ab 1. 4.), Heymans (ab 22.9.), Hujeirat, Khanzadyan, Knudsen (ab 1. 10.), Martinez-Delgado, Masciadri, Moro-Martin (1. 9. bis 30. 11.), Mosoni (ab 1. 9.), Pascucci (1. 7. bis 31. 8.), Penarubbia, Prieto, Soci, Staicu (1. 1. bis 31. 10.), Trujillo, Wang, Zucker

Wissenschaftliche Gäste: Abraham, Ungarn (März), Araya, Mexiko (August), Beckwith, USA (November/Dezember), Bacmann, Frankreich (Mai), Bjorkman, USA (Juli), Blanton, USA (Juni), Bryden, USA (März/April), Carretero, Spanien (November), Diethard, Deutschland (August), Deil, Deutschland (Juli/August), Eisenstein, USA (August/September), Erwin, USA (Juni), Endl, USA (August), Franco, Mexico (Juni–August), Fulara, Polen (November/Dezember), Hartung, Chile (Juli), Heavens, Scotland (Dezember), Hofner, USA (Juli/August), Hogg, USA (August/September), Jonsson, USA (Oktober/November), Kiss, Ungarn (Oktober), Koposov, Russland (Juni–September), Ligori, Italien (November/Dezember), Lodato, England (April), Maghakyan, Armenien (Oktober/November), Maier, Deutschland (Juni), Marco, Chile (April/Mai), Men'shchivov, Canada (Mai), Mosoni, Ungarn (September–November), Movsisyan, Armenien (Oktober/

November), Pavluchenkov, Russland (Februar–Mai), Pentericci, Italien (Februar–April) Pizagno, USA (Juni/Juli), Rebolo, Spanien (August), Rodler, Deutschland (August), Schreyer, Deutschland (März), Shields, UK (August), Smith, USA (Juli/August, Oktober), Somerville, USA (Mai), Stolte, USA (Juli), Toth, Ungarn (August/September), Trager, USA (Oktober), Tylor, UK (Juli), Veres, Ungarn (September–Oktober), Vibe, Russland (August–Oktober), Weldrake, Australien (Dezember), Willacy, USA (September), Williams, USA (August), Wyder, USA (Juni), Yasyunin, Russland (November/Dezember), Yee, Canada (September)

Durch die regelmäßig stattfindenden internationalen Treffen und Veranstaltungen am MPIA hielten sich weitere Gäste kurzfristig am Institut auf, die hier nicht im einzelnen aufgeführt sind.

Praktikanten: Hempelmann (1. 3. bis 31. 9.), Holzschuh (19. 7. bis 30. 9.), Kordell (ab 1. 9.), Maier (19. 7. bis 30. 9.), Schwarz Henriques (26. 7. bis 25. 9.), Wagenblaß (ab 1. 9.), Wiehl (1. 3. bis 30. 9.), Zechmeister (1. 9. bis 30. 9.)

Außenstelle Calar Alto, Almeria/Spanien

Lokale Leitung: Gredel

Astronomie, Koordination: Thiele, Frahm (Freistellungsphase Altersteilzeit ab 1. 7.)

Astronomie, Nachtassistenten: Aceituno, Aguirre, Alises, Cardiel, Guijarro, Hoyo, Pedraz, Sánchez (ab 1. 10.)

Teleskoptechnik, EDV: Capel, De Guindos, García, Helmling, Henschke, Hernández L., Hernández R., Raul López, Marín, Morante, Müller, W., Nuñez, Parejo, Schachtebeck, Usero, Wilhelmi (Freistellungsphase Altersteilzeit ab 1. 11.)

Technischer Dienst, Hausdienst: Aguila, A., Aguila, M., Ariza, Barbero (ab 1. 2.), Barón, Carreño, Corral, Domínguez, Gómez, Góngora, Klee, Rosario López, Márquez, Martínez, Romero, Sánchez, Tapia

Verwaltung, Sekretariat: Hernández, M., Hernández, M.J., López, M.I., Wagner M. (ab 15. 2.)

Arbeitsgruppen

Abteilung Planeten- und Sternentstehung

Direktor: Thomas Henning

Weltraum-Astronomie im Infraroten

Dietrich Lemke, Stephan Birkmann, Helmut Dannerbauer, Ulrich Grözinger, Ralph Hofferbert, Armin Huber, Csaba

Kiss, Ulrich Klaas, Oliver Krause, Ernest Krmpotic, Sven Kuhlmann, Stefan Mertin, Jürgen Schreiber, Jutta Stegmaier, Manfred Stickel, Viktor Toth, Roland Vavrek

Sternentstehung

Christoph Leinert, Cristina Afonso, Carlos Alvarez, Daniel Apai, Jeroen Bowman, David Butler, Xuepeng Chen, Cornelis Dullemond, Markus Feldt, Bertrand Goldmann, Miwa Goto, Bernhard Keil, Tigran Khazdyan, Rainer Köhler, Kacper Kornet, Ralf Launhardt, Rainer Lenzen, Hendrik Linz, Laszlo Mosoni, Ilaria Pascucci, Diethard Peter, Elena Puga, Sascha Quanz, Thorsten Ratzka, Florian Rodler, Alexander Schegerer, Oliver Schütz, Dmitri Semenov, Nikolai Voshchinnikov, Hongchi Wang, Sebastian Wolf

Braune Zwerge, Exoplaneten

Reinhard Mundt, Coryn Bailer-Jones, Kerstin Geißler, Wolfgang Brandner, Elena Masciadri, Boris Rockenfeller, Jens Rodmann, Johny Setiawan, Micaela Stumpf

Theorie

Natalia Dziourkevitch, Anders Johansen, Hubertus Klahr, Bernhard Keil, Jürgen Steinacker, Stefan Umbreit

Laborastrophysik

Friedrich Huisken, Olivier Debieu, Florian Dumitrac, Serge Krasnokutski, Gael Rouillé, Oleksandr Sukhorukov, Angela Staicu, Felix Voigt

Frontiers of Interferometry in Germany

Christoph Leinert, Olivier Chesneau, Uwe Graser, Ralf Launhardt, Frank Przygodda, Thorsten Ratzka

Adaptive Optik

Wolfgang Brandner, Carlos Alvarez, Joana Büchler, Alessandro Berton, David Butler, Fulvio De Bonis, Markus Feldt, Dimitrios Gouliermis, Stefan Hippler, Stefan Kellner, Elena Masciadri, Robert Weiß

Abteilung Galaxien und Kosmologie

Direktor: Hans-Walter Rix

Struktur und Dynamik von Galaxien

Hans-Walter Rix, Eva Schinnerer, David Andersen, Ignacio Trujillo, Vernesa Smolic, Richard D'Souza, Nadine Häring, Carl Jakob Walcher

Sternpopulationen und Sternentstehung

Fabian Walter, Thomas Herbst, John Cannon, Alexei Kniazev, Kirsten Kraiberg Knudsen, David Martinez Delgado, Dan Zucker, Sami Dib, Dominik Riechers

Galaxienentwicklung und Kosmologie

Eric Bell, Hans-Walter Rix, Helmut Hetznecker, Catherine Heymans, Zuzana Györyva, Martina Kleinheinrich, Marc Barden, Sadegh Khochfar, Angela Hempel, Andrea Borch, Siegfried Falterer

Aktive Galaxienkerne

Klaus Meisenheimer, Almudena Prieto, Laura Pentericci,
Nadine Häring, Marc Schartmann, Konrad Tristram

Sloan Digital Sky Survey

Eric Bell, Daniel Zucker, Alexei Kniazev, Laura Pentericci

Tiefe Durchmusterungen

Klaus Meisenheimer, Hermann-Josef Röser, Hans Hippelein,
Zoltan Kovacs, Siegfried Falterer, Boris Häußler

Instrumentierung

Thomas Herbst, Hermann-Josef Röser, Josef Fried, Roberto
Ragazzoni, Wolfgang Gäßler, Martin Kürster, David Ande-
rsen, Stefan Hanke, Roberto Soci, Sebastian Egner

Zusammenarbeit mit Firmen

ABB (ehem. Hartmann + Braun),

Alzenau

ADR, Paris

Agilent Technologies, Böblingen

Almet-AMB, Mannheim

Amphenol-Tuchel Electronics,

Heilbronn

Angst+Pfister, Mörfelden

APE Elektronik, Kuppenheim

Arthur Henninger, Karlsruhe

asknet AG

Auer Paul GmbH, Mannheim

bacuplast GmbH

Baier Digitaldruck, Heidelberg

Barr, Westford, USA

Barth, Leimen

Bectronic GmbH, Derschen

Beep, Almería

Best Power Technology, Erlangen

Beta Layout, Arbergen

Binder Magnete, Villingen-

Schwenningen

Black Box Communications, S.A.,

Madrid

Blaessinger, Stuttgart

Bohnenstiel, Heidelberg

Böllhoff GmbH, Winnenden

Börsig, Neckarsulm

Bubenzer Bremsen, Kirchen-

Wehrbach

Bürklin, München

C&K Components, Neuried b.

München

C.A.P. CNC+Coating Technik, Zell.

a. H.

CAB, Karlsruhe

Cadillac-Plastic, Viernheim

CAMCenter GmbH

Carl Roth, Karlsruhe

Caspar Gleidlager GmbH

Cherry Mikroschalter, Auerbach

Christiani, Konstanz

Coating-Plast, Schriesheim

Com Pro, Stuttgart

Compumess Elektronik,

Unterschleissheim

Comtronic GmbH,

Heiligkreuzsteinach

Conrad Electronic, Hirschau

Cryophysics GmbH, Darmstadt

Dannewitz, Linsengericht

DELL-Computer GmbH

Delta-V, Wuppertal

Deltron Components GmbH,

Neuried b. München

Demag Cranes & Components S.A.,

Coslada (Madrid)

Deti, Meckesheim

DMG-Service, Pfronten

DPV Elektronik, Eppingen

Dürkes & Obermayer, Heidelberg

Dyna Systems NCH, Mörfelden-

Walldorf

E2V, Chelmsford

EBARA Pumpen, Dietzenbach

EBJ, Ladenburg

EBV-Elektronik, Leonberg

EC Motion, Mönchengladbach

Edsyn Europa, Kreuzwertheim

EFH, Neidenstein

Eldon, Büttelborn

Elna Transformatoren, Sandhausen

elspec, Geretsried

ELV Elektronik, Leer

ERNI, Adelberg

eurodis Enatechnik, Quickborn

Europa-Lehrmittel, Verlag

EWf, Eppingen

Faber Industrietechnik GmbH,

Mannheim

Farben Specht, Bammental

Fairchild Imaging, Milpitas/ USA

Farnell in One, Deisenhofen

Farnell Electronic Services,

Möglingen

FCT Electronic, München

Fels Spedition, Heidelberg

Fisba, St. Gallen

Fischer Elektronik, Lüdenscheid

FPS-Werkzeugmaschinen GmbH,

Otterfing

Frank GmbH

Franke, Aalen

Fresemann Andreas

Fritz Faulhaber, Schönaich

Future Electronics Deutschland,

Unterföhring

Ganter, Walldorf

Geier Metall-u. Stahlhandel,

Mannheim

GENOMA Normteile, Hameln

Gerwah Präzision GmbH

GLT, Pforzheim

Goodfellow

Gould Nicolet Meßtechnik,

Dietzenbach

Grandpair, Heidelberg

Grulms-Pneumatik, Grünstadt

Grupo Hispatec Soluciones Globales

S.L., Almería

GRW, Würzburg

Gummi Körner, Eppenheim

Gummi-Plast Schild, Gernsheim

Gutekunst, Pfalzgrafenweiler

Halm+Kolb, Stuttgart

H.Bieri Engineering GmbH,

Winterthur

Heidenhain Dr. Johannes GmbH,

Traunreut

Heräus, Hanau

Hilger und Kern, Mannheim

Hilma-Römheld GmbH, Hilchenbach

Helukabel, Hemmingen

Hema, Mannheim

Herz, Leister Geräte, Neuwied

Hewlett-Packard Direkt, Böblingen

HM Industrieservice, Waghäusel

Hommel-Hercules Werkzeughandel,

Viernheim

Hormuth, Heidelberg	Moll, Bleche und Verarbeitung, Hirschberg	RS Components, Mörfelden-Walldorf
Horst Göbel, Ludwigshafen	MSC Vertriebs-GmbH, Stutensee	RSP-GmbH, Mannheim
Horst Pfau, Mannheim	MTI, Baden-Baden	Rudolf, Heidelberg
HOT Electronic, Taufkirchen	Munz, Lohmar	Rütgers, Mannheim
HTF Elektro, Mannheim	Mönninghoff, Bochum	Rufenach Vertriebs-GmbH, Heidelberg
Huber + Suhner, Taufkirchen	Nanotec, Finsing	Rutronik, Ispringen
Hummer+Rieß, Nürnberg	Neust Schaltungselektronik, Ehringshausen - Katzenfurt	Sauter-Cumulus GmbH
Häcker, Weinsberg	Newport, Darmstadt	Sartorius, Ratingen
Häfele Leiterplattentechnik, Schrießheim	Nickel Schalt- und Meßgeräte, Villingen-Schwenningen	Sasco, Putzbrunn
IBF Mikroelektronik, Oldenburg	Niedergesess, Sandhausen	Satec, Sevilla
Infosoft Siglo XXI S.L.L., Almería	Nies Electronic, Frankfurt	Scantec, Planegg
Infrared Laboratories, Tucson, USA	Noor, Viernheim	Schaffner Elektronik, Karlsruhe
Inkos, Reute/Breisgau	NOVA Elektronik, Pulheim	Schlossmacher Ingenieurbüro
INVENT GmbH	Oberhausen, Ketsch	Schrauben-Jäger AG
iSystem, Dachau	Olympus, Hamburg	Schulz Bürozentrum GmbH
Jacobi Eloxal, Altlussheim	Optima Research, Stansted, GB	Schuricht, Fellbach-Schmid
Jarmyn, Limburg	Otto Faber, Mannheim	Schweizer Elektroisierungsstoffe, Mannheim
Ingenieurbüro Steinbach, Jena	Otto Ganter, Furtwangen	SCT Servo Control Technology, Taunusstein
Joisten+Kettenbaum, Bergisch Gladbach	Orglmeister	SE Spezial-Electronic, Bückeburg
Hahn u. Kolb GmbH	OWIS GmbH, Staufen	Seifert mtm Systems, Ennepetal
Kaufmann, Crailsheim	Parametric Technology, Muenchen	Siemens IC-Center, Mannheim
Kerb-Konus-Vertriebs-GmbH, Amberg	Parcom, CH-Flurlingen	SolidLine AG
Kniel, Karlsruhe	pbe Electronic, Elmshorn	Spaeter, Viernheim
Knürr, München	Pfeiffer Adolf GmbH, Mannheim	Sphinx Computer, Lauderbach
Krüß Optronik, Hamburg	Pfeiffer Vacuum, Asslar	Spindler & Hoyer, Göttingen
Kurt Norr & Co	Pfister Büro	Spoerle Electronic, Dreieich
KVT CANESPA, Langenhagen	Phonix Contact GmbH & Co, Blomberg	Stahlschlüssel Wegst GmbH
Lambda Electronics, Achern	Physik Instrumente, Waldbronn	Steinbach M. Ingenieurbüro
Laser Components	Phytec Meßtechnik, Mainz	Stirling Cryogenics, NL-5692 EB Son
Layher, Güglingen	Phytron, Gröbenzell	Straschu Leiterplatten, Oldenburg
Leybold Vacuum, Köln	Plastipol, Runkel	SUCO-Scheuffele, Bietigheim- Bissingen
Lemo Elektronik, München	Pleiger, Witten	Synatron, Hallbergmoos
Lineartechnik Korb, Korb	POG, Gera	Tautz GmbH
Lödige Aufzugstechnik GmbH, Paderborn	PROUT Services+Hardware GmbH	Tandler, Brauen
Lopez Baena S.A., Almería	PSI Tronix, Tulare, California, USA	Technik Direkt, Würzburg
LPKF CAD/CAM Systeme, Garbsen	Pühl A. GmbH	TELDIX GmbH
LWS-Technik GmbH & Co.	Püschel Elektronik, Mannheim	THK, Düsseldorf
Macrotron, München	R.E.D. Regional-Electronic- Distribution, Rodgau-Jügesheim	Thorlabs, Gruenberg
Mädler, Stuttgart	Radiall, Rödermark	TMS Test- und Meßsysteme, Herxheim/Hayna
Mankiewicz, Hamburg	RALA, Ludwigshafen	Tower Electronic Components, Schriesheim
Mannesmann Dematic AG, Wetter	Rau-Meßtechnik, Kelkheim	TRIVIT AG
Matsuo Electronics Europe, Eschborn	Räder Gangl, München	TS-Optoelectronic, München
Matsushita Automation, Holzkirchen	Reeg, Wiesloch	TWK-Elektronik, Karlsruhe
Maxim Ges. f. elektronische integrier- te Bausteine, Planegg	Reinhold Halbeck, Offenhausen	Vacuumschmelze, Hanau
Melles Griot, Bensheim	Reith, Mannheim	VBE Baustoff+Eisen, Heidelberg
Menges electronic, Dortmund	Retronic, Ronneburg	Vereinigte Baustoff-und Eisen GmbH
Mentor, Erkrath	Rexim, Maulbronn	Vero Electronics, Bremen
Metrofunkkabel-Union, Berlin	Riekert & Sprenger, Wertheim	VISION Engineering, Emmering
Misco Ibérica Computer Supplies, S.A., Madrid	Rittal-Werk, Herborn	W. & W. Schenk, Maulbronn
Mitsubishi-Electric, Weiterstadt	Roland Häfele Leiterplattentechnik, Schriesheim	Wietholt Heinrich GmbH
Möller-Wedel, Wedel	Roth Carl GmbH, Karlsruhe	Wikotec, Bramsche

Wilhelm Gassert, Schriesheim
WS CAD Electronik, Berk Kirchen

Witter GmbH, Heidelberg
WIKA, Klingenberg

Zeiss Carl, Optronics GmbH
Zemax, San Diego, USA

Lehrveranstaltungen

Sommersemester 2004

Henning, Th.: Physik der Sternentstehung (Oberseminar)
Meisenheimer, K.: High Resolution Observation of Active Galactic Nuclei (Vorlesung)

Wintersemester 2004/2005

Fried, J. (mit B. Fuchs): Galaxien (Vorlesung)
Henning, Th.: Protostellare Scheiben (Vorlesung)
Henning, Th.: Physik der Sternentstehung (Oberseminar)
Leinert Ch., Röser, H.-J.: Einführung in die Astronomie und Astrophysik (Vorlesung)
Lemke D. (mit Bartelmann M. H.-P. Gail und J. Heidt): Einführung in die Astronomie und Astrophysik III (Seminar)
Meisenheimer, K. (mit J. G. Kirk und S. Wagner): Radiogalaxien und Quasare (Seminar)
Rix, H.-W. (mit B. Fuchs, A. Just, R. Spurzem): Struktur, Kinematik und Dynamik von Sternsystemen (Seminar)

Sommersemester 2004

Leinert, Ch., Lemke, D., Mundt, R., Röser, H.-J., (mit M. Bartelmann): Einführung in die Astronomie und Astrophysik III (Vorlesung)
Rix H.-W. (mit B. Fuchs, A. Just und R. Spurzem): Stellar-dynamik (Oberseminar)

Fortgeschrittenenpraktikum: Für Physik- und Astronomiestudenten wird während des Semesters ein Versuch zur Adaptiven Optik angeboten. Innerhalb von vier Nachmittagen kann ein Analysator zur Untersuchung der Verformung von Lichtwellen aufgebaut und optische Aberrationen wie Koma und Astigmatismus bestimmt werden. Der Versuch findet im Labor für Adaptive Optik am MPIA statt. (Verantwortlich.: S. Hippler, W. Brandner; Betreuer: S. Kellner, O. Schütz, A. Berton). Am 70-cm-Teleskop des MPIA wird der Versuch »Stellare CCD-Photometrie« durchgeführt. (S. Brinkmann, E. Krmpotic, M. Schartmann, K. Tristram)

Tagungen, Vorträge

Veranstaltete Tagungen

Vom Institut veranstaltete Tagungen

Project Management Course, Februar (Lemke)
GEMS Workshop, 3.-5. März (Bell)
SISCO Workshop, 8.-9. März (Bell, Meisenheimer)
Kuratoriums-Kolloquium, 9. März
MPIA Internal Symposium, 20.-21. April (Rix, Rodmann)
PRIMA Science Meeting, Mai (Launhardt, Setiawan)
First MPIA Student Workshop, Rügen, 3.-6. Juni (Nadine Häring)
Second Tübingen/Heidelberg Workshop on Astrophysical Fluid Dynamics, 28./29. Juni
PRIMA DDL Technical Meeting, Juni (R. Launhardt, J. Setiawan)
Arbeitstreffen der Forschergruppe »Laborastrophysik«, 2. Juli (Steinacker)
2nd Heidelberg/Tübingen Workshop on Astrophysical Fluid Dynamics, 28./29. Juli. (Klahr, Umbreit, Kley/Tübingen)
Ringberg-Workshop »CHEOPS Phase-A Study Results«, 14.-17. September (Feldt, Henning, Hippler)
Inaugural Meeting of the Science Council of the European Interferometry Initiative, 24. September (Graser, Henning)

Workshop »Chemistry in Disks«, September (Henning)
Workshop »The Central Parsec of Galaxies«, 6.-8. Oktober (Haering, Prieto, Camenzind/LSW)
Workshop »Chemistry of Protoplanetary Disks: Algorithms and Results«, 11.-13. Oktober (Häring, Klahr, Semenov, Wolf)
VLTI/MIDI Data Reduction, Analysis and Science School, Leiden, 11.-15. Oktober (mit NOVA und ESO)
Symposium »Die Planeten der Sonne und der fernen Sterne«, 26. Oktober (Henning, Staude, Klaus-Tschira-Stiftung)
Fachbeirats-Kolloquium, 15. November (Brandner)
Kuratoriums-Kolloquium, 17. November
Ringberg Workshop »Structure and Evolution of the Milky Way and its Surroundings«, Schloss Ringberg, 5.-9. Dezember (Rix)
Ringberg Workshop »Planet Formation: Theory Meets Observation«, Schloss Ringberg, 19.-22. Dezember (Brandner, Kellner, Klahr, Johansen, Umbreit)
Second Workshop »Science Case for the mid-infrared imaging interferometer APRES-MIDI«, Dezember (Wolf)

Andere veranstaltete Tagungen

Coryn Bayler-Jones: GAIA Classification Meeting, University of Cambridge, 15.-16. April; GAIA Classification Meeting, Observatoire de Paris, 8. Oktober; GAIA German Coordination meeting, November; GAIA classification meeting, National and Kapodistrian University of Athens, 25.-26. November; Conference »The three dimensional universe with GAIA«, Observatoire de Paris, 4.-7. Oktober

Tomas Henning: 2nd. TPF/DARWIN International Conference »Dust Disks and The Formation, Evolution and Detection of Habitable Planets«, San Diego, 27. Juli

Tom Herbst: LBT Interferometry Meeting, Tucson, Januar

Friedrich Huisken: 24th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Special Molecular Beams Session, Bari, 10.-16. Juli (mit V. Aquilanti)

Dietrich Lemke: SPIE Conference »Astronomical Structures and Mechanisms«, Glasgow, 21.-25. Juni (Co-Chairman)

Sebastian Wolf: First Workshop »Science Case for the mid-infrared imaging interferometer APRES-MIDI«, Observatoire de la Côte Azur, Februar (Co-Organizer)

Teilnahme an Tagungen, wissenschaftliche und öffentliche Vorträge*Wissenschaftliche Vorträge*

Daniel Apai: 2nd. TPF/DARWIN International Conference »Dust Disks and The Formation, Evolution and Detection of Habitable Planets«, San Diego, 27. Juli (Vortrag)

Marco Barden: Ringberg workshop »Secular Evolution of Disk Galaxies«, Schloss Ringberg, 17.-21. Mai (Vortrag)

Coryn Bayler-Jones: GAIA photometry working group meeting, Torino, 21. Januar; GAIA science team meeting, Torino, 22.-23. Januar; GAIA science team meeting, ESTEC, Netherlands, 2.-3. März; Jahrestagung der Gesellschaft für Klassifikation, Dortmund, März (Vortrag); MPIA Internes Symposium, April (Vortrag); GAIA classification meeting, University of Cambridge, 15.-16. April; IAU Coll. 196, »Transits of Venus: New views of the solar system and Galaxy«, Preston, England, 7.-11. Juni (eingeladener Vortrag); GAIA photometry working group meeting, Copenhagen, 28.-29. Juni (Vortrag); GAIA science team meeting, Copenhagen, 30. Juni-1. Juli; »Cool Stars 13«, Hamburg, Juli (Vortrag, 2 Poster); Technische Universität Berlin, 29. Juli (Kolloquiumsvortrag); »The three dimensional universe with GAIA«, Observatoire de Paris, 4.-7. Oktober (eingeladener Vortrag, Poster); GAIA classification meeting, Observatoire de Paris, 8. Oktober; GAIA classification meeting, National and Capodistrian University of Athens, 25.-26. November; GAIA German Coordination meeting, November; GAIA science team meeting, Barcelona, 16.-17. Dezember (Vortrag)

Eric Bell: AAS Conference, Atlanta, Januar (Vortrag, Pressekonferenz); SDSS Workshop Las Cruces, New Mexico, 15.-18. März (Vortrag); HST May Symposium, Baltimore, 3.-6. Mai (eingeladener Vortrag); AAS Conference, Denver, 31. Mai - 3. Juni (Vortrag, Pressekonferenz); The Environment of Galaxies, Kreta, 9.-13. August (Vortrag); GEMS Workshop, Potsdam, 13.-15. September (Vorträge); SISCO Workshop Groningen, 23.-24. September (Vortrag); Massive Galaxies Workshop, 27.-29. September (Vortrag);

SDSS Meeting, Pittsburgh, 30. September - 2. Oktober (Vortrag); Ringberg Symposium »Galaxy Mergers« 1.-5. November (Vortrag); Bad Honnef, Schwerpunkte Program Assessment, 8. November (poster); Kolloquium in Göttingen (Poster)

Alessandro Berton: SPIE Congress, Glasgow, 21.-25. Juni (zwei Poster); Michelson Summer School, Pasadena, 20.-23. Juli; CHEOPS Ringberg-Tagung, 14.-17. September (zwei Vorträge); IFS »Detection simulation«, XVI Canary Islands Winter School, Tenerife, 21. November - 3. Dezember; CHEOPS Workshop at ESO, Garching, 15.-16. Dezember

Wolfgang Brandner: Astronomical Polarimetry, Waikoloa, HI, USA, 15.-19. März (Poster) MPIA Internal Colloquium, 20.-21. April (Vortrag); Calar Alto Colloquium, Granada, 27. April (Vortrag); IMF at 50, Festkolloquium für Ed Salpeter, Spineto, Italien, 16.-20. Mai (Vortrag); NAHUAL - High RESolution IR Spectrograph for GTC, La Gomera, Spain, 10.-12. Juni (Vortrag); AG Frühjahrstagung »Cool Stars, Stellar Systems & The Sun«, Hamburg, 5.-9. Juli (Poster); CHEOPS Ringberg Workshop, 12.-15. September (Vortrag); Planetenbildung, Münster, 6.-8. Oktober (Vortrag); MPIA Kuratoriums-Kolloquium, 17. November (Übersichtsvortrag); Ringberg Workshop on Planet Formation, 19.-22. Dezember, Übersichtsvortrag

Stephan Birkmann: SPIE Conference »Optical, Infrared, and Millimeter Space Telescopes«, Glasgow, 21.-25. Juni (Poster); Sommerschule »Birth, Life and Death of Stars«, Alpbach, August

Joana Büchler Costa: 3. SPIE-Conference: »Astronomical Telescopes and Instrumentation«, Glasgow, 21.-25. Juni (Vortrag, Poster)

David Butler: Ringberg Workshop »Structure and Evolution of the Milky Way and its Surroundings«, Schloss Ringberg, 5.-9. Dezember (Poster)

Helmut Dannerbauer: ESO ALMA Community Day, Garching 24. September; »The DUSTY and Molecular Universe - A prelude to HERSCHEL and ALMA«, Paris, 27.-29. Oktober (Poster)

- Sami Dib: Universitäts-Sternwarte München. 23. Februar (Vortrag); MPIA's internal symposium, Heidelberg, 20.–21. April (Vortrag); 2nd Heidelberg-Tübingen workshop on Astrophysical Fluid Dynamics, Heidelberg, 28.–29. Juni, (Vortrag); Conference »Cosmic ray dynamics: From turbulent to Galactic-scale magnetic fields«, Copenhagen, 2.–4. September (Vortrag); AG Splinter meeting: »Astrophysical Turbulence«, Prague, 20.–25. September (Vortrag)
- Cornelis Dullemond: Workshop on Planet Formation, Münster, Oktober (Vortrag); Workshop on Spectral Energy Distributions of Galaxies, Heidelberg, Oktober (Poster); Workshop on Central Parsec of Galaxies, Heidelberg, Oktober (Vortrag); First SPITZER Space Telescope Conference, November (Vortrag); Ringberg Workshop on Planet Formation, Dezember (Übersichtsvortrag)
- Sebastian Egner: Workshop »PSF reconstruction for Adaptive Optics«, Victoria, Canada, 10.–12. Mai (Vortrag); SPIE Conference »Advancements in Adaptive Optics«, Glasgow, 21.–25. Juni (Poster)
- Siegfried Falterer: 1. IAU Colloquium no. 195, »Outskirts of galaxy clusters: Intense life in the suburbs«, Turin, 12.–16. März (Poster); 7th Birmingham Extragalactic Workshop, »Constructing galaxy clusters«, Birmingham, 28.–29. Juni (Vortrag); Astrophysik-Seminar, Bamberg, 14. Juli (Vortrag)
- Markus Feldt: CHEOPS General Meeting, Amsterdam, 4.–5. April; »CHEOPS« Ringberg-Workshop, 12.–15. September (Vortrag); JRA1/OPTICON Meeting, Garching, 1.–2. März (Vortrag); »Exploring the Cosmic Frontier – Astrophysical Instruments for the 21st Century«, Berlin, 18.–21. Mai (Vortrag); SPIE Europe International Symposium – Astronomical Telescopes«, Glasgow, 21.–25. Juni (Vortrag)
- Wolfgang Gässler: SPIE Meeting »Astronomical Telescopes and Instrumentation«, Glasgow, 21.–25. Juni (Zwei Vorträge, Poster); Workshop »Exploring the Cosmic Frontier, Astrophysical Instruments for the 21st Century«, Berlin, Harnack-Haus, 18.–21. Mai (Poster)
- Dimitrios Gouliermis: International Conference »The Initial Mass Function 50 years later«, Abbazia di Spineto, Siena, 16.–20. Mai, (Poster); »The First NEON Archive Observing School Summer School«, ESO, Garching, 14.–24. Juli, (Vortrag); Seminar on »Retrieval and reduction of HST/WFPC2 data from the HST Archive«, Athen, 17.–20. Dezember
- Roland Gredel: OPTICON/Medium Sized Telescopes Working Group, Teneriffa, 22.–24. Januar; NEON Summer School, ESO Garching, 14.–17. Juli (Vortrag); OPTICON/Medium Sized Telescopes Working Group, Paris, 12.–13. August; JENAM Granada, 13.–15. September (Calar Alto Teleskopmodelle, drei Poster); OPTICON/Telescope Directors Forum, OHP Frankreich, 17.–18. November
- Nadine Häring: Lorentz Center Workshop: The Nuclei of Galaxies, Leiden, 25.–30. Juli, (Vortrag); Workshop »The Central Parsec of Galaxies«, Heidelberg, 6.–8. Oktober (Vortrag)
- Thomas Henning: Universität Göttingen, Mai (Kolloquiumsvortrag); Internationales Symposium »Exploring the Cosmic Frontier: Astrophysical Instruments for the 21st Century«, Berlin, Mai (Eingeladener Vortrag); Banff Meeting »Cores, Disks, Jets and Outflows in Low and High Mass Star Forming Environments: Observations, Theory and Simulations«, Kanada, Juli (Poster); ESA Workshop »Cosmic Vision 2015–2025, the Scientific Themes of Tomorrow«, Paris, September (Eingeladener Vortrag); Symposium »Die Planeten der Sonne und der fernen Sterne«, Heidelberg, Oktober (Eingeladener Vortrag); Konferenz »The DUSTY and Molecular Universe. A Prelude to HERSCHEL and ALMA«, Paris, Oktober (Eingeladener Vortrag); Universität Wien, Dezember (Kolloquiumsvortrag); Ringberg Workshop »Planet Formation: Theory meets Observation«, Schloss Ringberg, Dezember (Eingeladener Vortrag)
- Tom Herbst: LBT Interferometry Meeting, Tucson Januar (Vortrag); Kuratoriums-Kolloquium, 9. März (Vortrag); UK National Astronomy Meeting, Milton Keynes, 30. März (eingeladener Vortrag); MPIA Internal Symposium, 21. April (Vortrag); SPIE Conference 22.–24. Juni (Vortrag, eingeladener Vortrag); 2nd TPF/DARWIN International Conference, San Diego, 27. Juli (eingeladener Vortrag); FRINGE Meeting, Heidelberg, 2. November (Vortrag); Fachbeirats-Kolloquium, 15. November (Vortrag)
- Stefan Hippler: Workshop »Adaptive Optical Phase Forming – Future Development Objectives«, Dresden, 1. März (Eingeladener Vortrag); CHEOPS Workshop, Amsterdam, 5./6. April (Eigener Vortrag); Treffen zur Vorbereitung eines Sonderforschungsbereichs »Adaptive Optik«, Dresden, 28. Juni (Vortrag); Ringberg-Workshop »CHEOPS«, 14.–17. September (Vorträge); CHEOPS Phase-A Review, ESO, Garching, 16. Dezember (Vortrag)
- Ralph Hofferbert: SPIE-Konferenz »Astronomical Telescopes and Instrumentation«, Glasgow, 21.–25. Juni (Vortrag)
- Friedrich Huisken: 14th Symposium on Atomic, Cluster, and Surface Physics, La Thuile, Aosta, 1.–6. Februar (eingeladener Vortrag); 24th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Bari, 10.–16. Juli (eingeladener Vortrag); International Conference on Advanced Laser Technologies, Rom und Frascati, 10.–15. September (eingeladener Vortrag); Universität Jena, 27. April: Vorstellung an der Fakultät für Physik (Kolloquiumsvortrag); Institut für Festkörperphysik, Universität Jena, 18. Juni (Kolloquiumsvortrag); 4th Lyon Workshop on Nano-Optics, Lyon, 20.–21. September (Vortrag)
- Anders Johansen: Münster Workshop für Planetenentstehung (Vortrag); The Origin of Planetary Systems network mid-term review, Frejus (Vortrag); Workshop on »Planet Formation: Theory meets Observations« (Poster)
- Bernhard Keil: First MPIA Student Workshop, Rügen, 3.–6. Juni (Vortrag); 2nd Tübingen/Heidelberg Workshop on Astrophysical Fluid Dynamics, 28.–29. Juni; HLRS Parallel Programming Workshop, Stuttgart, 10.–11. Oktober; Summer School on Mathematical Modelling and Computational Challenges in Plasma Physics and Applications, Cargèse (Corsica), 25.–30. Oktober

- Stephan Kellner: SPIE Advancements in Adaptive Optics, Glasgow, 21.–25. Juni (Vortrag); Ringberg Workshop »Planet formation and detection – theory meets observation«, 19.–22. Dezember (Vortrag); RTN meeting, Lund (Vortrag)
- Ulrich Klaas: HERSCHEL Calibration Workshop, Leiden, Dezember (Vortrag)
- Hubert Klahr: Planet Formation Workshop, Santa Barbara, USA, März (Vortrag); NCAC, Warschau, April (Kolloquiumsvortrag); Ringberg Workshop on Circumstellar Disks, April (eingeladener Vortrag); Workshop on Planet Disk interaction, Stockholm, Mai (Vortrag); 2nd Tübingen-Heidelberg Workshop on Astrophysical Fluid Dynamics (28.–29. Juni) (Vortrag); Astronomisches Kolloquium, Heidelberg, Juli (Vortrag); BAR-Meeting, MPIK, Heidelberg, September (Vortrag); Workshop Chemistry in Disks, Heidelberg, Oktober (Vortrag); Workshop Planetenbildung, Münster, Oktober (Vortrag); Universität Braunschweig, November (Kolloquiumsvortrag); EU-Network School on Numerical Methods in Planet Formation, Frejus, November (Vorlesung); Ringberg Workshop on Planet Formation: Theory meets Observation, Dezember (eingeladener Vortrag)
- Kirsten K. Knudsen: BoA Meeting, Bonn, 29. November; Submm Astrophysics Workshop, Kopenhagen, 20.–21. Dezember (Vortrag)
- Rainer Köhler: 3. SPIE-Conference: »Astronomical Telescopes and Instrumentation 2004«, Glasgow, 21.–25. Juni (Poster); Michelson Summer School, Pasadena; 2nd. TPF/DARWIN International Conference, San Diego (Poster)
- Kacper Kornet: Ringberg Workshop »Planet Formation: Theory meets Observation«, 19.–22. Dezember, Tegernsee (Vortrag)
- Martin Kürster: Workshop Planetenbildung: Das Sonnensystem und extrasolare Planeten, 6.–8. Oktober 2004 in Münster (zwei Vorträge)
- Christoph Leinert: SPIE Conference »New Frontiers in Stellar Interferometry«, Glasgow, 21.–25. Juni (eingeladener Vortrag); Astronomisches Kolloquium, Heidelberg (Vortrag); MIDI Data Reduction School, Leiden, 1.–15. Oktober (Vorlesungen)
- Dietrich Lemke: International Cryogenic Engineering Conference Nr. 20, Peking, Mai (eingeladener Plenarvortrag); SPIE Conference »Astronomical Telescopes and Instrumentation«, Glasgow, 21.–25. Juni (Vortrag, mehrere Poster); Sommerschule »Birth, Life and Death of Stars«, Alpbach, August (eingeladener Vortrag); Raumfahrt-Kolloquium »Forschung im Weltraum«, Aachen, November (eingeladener Vortrag)
- Sebastiano Ligori: SPIE Conference »New Frontiers in Stellar Interferometry«, Glasgow, 21.–25. Juni (2 Poster), ALMA Day, Garching, 24. September
- Hendrik Linz: Joint Meeting of the Czech Astronomical Society and 78. Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft, Prag, September (Vortrag)
- Elena Masciadri: SPIE-Tagung »Astronomical Telescopes and Instrumentation«, Glasgow, 21.–25. Juni (ein Vortrag, zwei Poster); Conference on »Low-mass Stars and Brown Dwarfs: IMF, Accretion and Activity«, Volterra, 17.–19. Oktober (Vortrag); International Workshop at IA-UNAM (Mexico) 11.–12. Februar (Vortrag); CHEOPS-Workshop, Ringberg, September (Vortrag)
- Klaus Meisenheimer: Physikalisches Kolloquium der Universität Freiburg, 12. Juli (Vortrag); SISCO mid-term meeting, Groningen, 22.–24. September (Vortrag); Workshop »The Central Parsec of Galaxies«, 6.–8. Oktober (Vortrag); Zwei Vorlesungen über Multiband Surveys, Neapel, 1.–9. September; Kuratoriums-Kolloquium am MPIA, 17. November (Vortrag)
- Reinhard Mundt: Workshop »The sun, cool stars and stellar systems 13«, Hamburg, 5.–9. Juli (Vortrag)
- Ilaria Pascucci: 2nd. TPF/DARWIN International Conference »Dust Disks and The Formation, Evolution and Detection of Habitable Planets«, San Diego, 27. Juli (Vortrag)
- Jorge Penarrubia: Ringberg Workshop »The Structure and Evolution of the Milky Way and Its Surroundings«, Schloss Ringberg, 5.–9. Dezember (eingeladener Vortrag)
- Sascha Quanz: 37th Liege Colloquium »Science Case for Next Generation Optical/Infrared Interferometric Facility – the post VLTI era«, Lüttich, 23.–25. August; VLTI/MIDI Data Reduction, Analysis and Science School, Leiden, Oktober; XVI- Canary Islands Winterschool of Astrophysics: »Exoplanets«, Instituto de Astrofísica de Canarias, Tenerife, 22. November – 3. Dezember
- Hans-Walter Rix: Jerusalem Winter School at The Hebrew University, Jerusalem, Israel, 29. Dezember – 10. Januar (drei Vorträge); Universität Basel, 13. Januar (Kolloquiumsvortrag); Space Telescope Science Institute, Baltimore, 3.–5. Februar (Kolloquiumsvortrag); SDSS Meeting, NMSU, New Mexico, 15.–18. März; Tagung »Growing Black Holes«, Garching, 21. Juni (Vortrag); Tagung »PLUMIAN 300 – Quest for a Concordance Cosmology«, Cambridge, UK, 5.–8. Juli (Vortrag); Aspen Summer Workshop, Aspen, Colorado, 9.–17. Juli (Vortrag); FIRES Workshop, Sterrewacht Leiden, 15.–17. September (Vortrag); OPTICON Meeting Leiden, 21. September; Astronomisches Rechen-Institut, Heidelberg, 28. September (Institutskolloquium); JWST-Meeting »Cosmology with NIRSPEC«, Ottobrunn, 5. Oktober (Vortrag); Conference SED 2004 at MPI für Kernphysik, Heidelberg, 6. Oktober (Vortrag); Ohio University, Ohio, 25.–28. Oktober (Vortrag)
- Jens Roddman: 2nd TPF/DARWIN International Conference, San Diego, 27. Juli (Vortrag); Fourth IRAM Millimeter Interferometry School, Grenoble, 22.–26. November (Poster)
- Ralf-Rainer Rohloff: SPIE conference, Glasgow, 21.–25. Juni (Vortrag)
- Marc Schartmann: Workshop »The structure and composition of Active Galactic Nuclei: Optical interferometry and adaptive optics of NGC 1068«, Lorentz Center, Leiden, 12.–14. Januar (Vortrag); Workshop »Introduction to

- Computational Fluid Dynamics«, HLRS Stuttgart, 29. März – 2. April; 2nd Tübingen/Heidelberg Workshop on Astrophysical Fluid Dynamics, Heidelberg, 28.–29. Juni; JENAM 2004, »The many scales of the universe«, Granada, 13.–15. September (Poster); SED Workshop »The spectral energy distributions of gas rich galaxies: confronting models with data«, MPIK Heidelberg, 4.–8. Oktober (Poster); Workshop »The central pc of galaxies«, Heidelberg, 6.–8. Oktober (Vortrag)
- Eva Schinnerer: Workshop »The Evolution of Starbursts«, Bad Honnef, August, (Vortrag); Cambridge, UK, September (Vortrag); ESO ALMA community day, September (Vortrag); Conference »The DUSTY and Molecular Universe: A Prelude to HERSCHEL and ALMA«, Paris, Oktober (Vortrag)
- Dimitri Semenov: Chemistry Workshop On The Disk Chemistry – Algorithms and Results, Heidelberg, Oktober (Vortrag)
- Johny Setiawan: MPIA internal symposium, April (Vortrag); Workshop on Cool Stars, Hamburg, 5.–9. Juli (Vortrag, Poster); Symposium of the Indonesian Physical Society, Pekanbaru, 24.–25. August (Vortrag); CHEOPS workshop, Ringberg 12.–15. September; Workshop Planetenbildung, Münster, 6.–9. September (Vortrag); Ringberg Workshop »Planet Formation: Theory meets Observation«, 19.–22. Dezember (Vortrag)
- Roberto Soci: SPIE Conference »Advancements in Adaptive Optics«, Glasgow, 21.–25. Juni (Vortrag)
- A. Staicu: 14th Symposium on Atomic, Cluster, and Surface Physics, La Thuile, Aosta, 1.–6. Februar (Poster); 68. Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, München, 22.–26. März (Vortrag)
- Jürgen Steinacker: Seminaire de l'Observatoire de Bordeaux, 1. April (Vortrag); Bochum Science Seminar, 13. April (Vortrag); Astronomisches Kolloquium Bonn, 11. Juni (Vortrag); ESO, München, 22. Juni (Kolloquiumsvortrag); 2nd Heidelberg/Tübingen Workshop on Astrophysical Fluid Dynamics, Heidelberg, 28. Juni (Vortrag); Conference »Cool Stars, Stellar Systems and the Sun 13«, Hamburg, 8. Juli (Vortrag); Banff Meeting »Cores, Disks, Jets & Outflows in Low & High Mass Star Forming Environments: Observations, Theory and Simulations«, Kanada, 12. Juli (Vortrag); AG Splinter meeting »The Formation of Massive Stars«, Prag, 21. September, (Vortrag); Workshop »The Spectral Energy Distribution of Gas Rich Galaxies: Confronting Models with Data«, 4. Oktober (Vortrag); Workshop »Planet-Formation: The Solar System and Extra-Solar Planets, Münster, 7. Oktober (Vortrag); 1. Internal MPIA Symposium, Heidelberg, 20. April (Vortrag); C3 Professorship Application ITA Heidelberg 25. Oktober (Vortrag); European Research-Training Network »PLANETS: Numerical Methods for the Simulations of Planet Formation«, Frejus, 29. November (Vorlesung)
- Manfred Stickel: Konferenz »The DUSTY and Molecular Universe – A prelude to HERSCHEL and ALMA«, Paris, Oktober
- Ignacio Trujillo: Conference »Massive Galaxies Over Cosmic Time«, STScI, Baltimore, 27.–29. September (Vortrag); 1st Arizona/Heidelberg Symposium: »The High Redshift Frontier«, Tucson, 30. November – 3. Dezember (eingeladener Vortrag)
- Stefan Umbreit: Astronomy of the American Astronomical Society, Cannes, 19.–23. April (Vortrag); Annual Meeting of the AAS/Division of Dynamical Astronomy, Mai (Vortrag); AG-Tagung Prag, September (Poster); Conference »Low-Mass Stars and Brown Dwarfs, Volterra, 17.–19. Oktober (Vortrag); Astronomical Institute of the University Bonn, 10. Dezember (Vortrag)
- Karl Wagner: SPIE Conference »Astronomical Telescopes and Instrumentation«, Glasgow, 21.–25. Juni
- Fabian Walter: Seminaire de l'Observatoire de Bordeaux, 1. April (Vortrag); Bochum Science Seminar, 13. April (Vortrag); Astronomisches Kolloquium, Bonn, 11. Juni (Vortrag); ESO Colloquium, Garching, 22. Juni (Vortrag); Workshop »The Evolution of Starbursts«, Bad Honnef, August, (Vortrag); Cambridge, UK, September (Vortrag); ESO ALMA community day, September (Vortrag); Paris, Oktober (Vortrag); C3 Professorship Application ITA Heidelberg, 25. Oktober (Vortrag)
- Sebastian Wolf: Conference »Astronomical Polarimetry – Current Status and Future Directions«, Hawaii, 15.–19. März (Vortrag); Conference »Modelling the Structure, Chemistry and Appearance of Protoplanetary Disks Schloss Ringberg, 13.–17. April (Vortrag); 37th Liege Colloquium »Science Case for Next Generation Optical/Infrared Interferometric Facility – the post VLTI era«, Lüttich, 23.–25. August (Vortrag); Workshop »Planetenentstehung«, Münster, 6.–8. Oktober (Vortrag); Workshop »Chemistry of Protoplanetary Disks: Algorithms and Results«, Heidelberg, 11.–13. Oktober (Vortrag); Conference »The DUSTY and Molecular Universe – A prelude to HERSCHEL and ALMA, Paris, 27.–29. Oktober (Vortrag und Poster)

Öffentliche Vorträge

- Markus Feldt: Veranstaltungsreihe »Physik am Samstagmorgen« des MPI für Kernphysik, Heidelberg, 13. März (Vortrag)
- Roland Gredel: Deutsche Schule Marbella, 10. Juni (Vortrag); Universität Almeria, 11. Oktober (Vortrag); Universität Almeria, 8. November (Vortrag)
- Nadine Häring: Veranstaltungsreihe »Physik am Samstagmorgen« des MPI für Kernphysik, Heidelberg, 13. März (Vortrag)
- Klaus Meisenheimer: Vortrag im Planetarium Mannheim, 14. Dezember
- Dietrich Lemke: Planetarium Wolfsburg, Januar (Vortrag); Veranstaltungsreihe »Physik am Samstagmorgen« des

MPI für Kernphysik, Heidelberg, 13.3. (Vortrag); Astronomisches Kolloquium Univ. Helsinki, April (Vortrag); Planetarium Stuttgart, November (Vortrag)
 Axel M. Quetz: Veranstaltungsreihe »Physik am Samstagmorgen« des MPI für Kernphysik, Heidelberg, 13.3. (Vortrag); Max-Rill-Schule, Reichersbeuern, 22.10.2004: „Entstehung von Planetensystemen“

Hans-Walter Rix: TÜV Jahresversammlung, Hamburg, 27. Mai (Vortrag)
 Jens Roddmann: »Languages of Science – Sprachen der Wissenschaft«, Berlin, 14/15. Mai (Vortrag)
 Jakob Staude: Jahresversammlung der MPG, Stuttgart, Juni (Schulvortrag); Science Academy, Heidelberg, 6. September (Vortrag); Symposium »Die Planeten der Sonne und der fernen Sterne«, Heidelberg, 26. Oktober (eingeladener Vortrag)

Mitarbeit in Gremien

Coryn Bayler-Jones: Member of the GAIA Science Team; Leader of the GAIA Classification Working Group; Core member of the GAIA Photometry Working Group; Member of the Scientific Organizing Committee of Commission 45 (Stellar Classification) of the International Astronomical Union

Marco Barden: Stellv. Mitglied im Calar-Alto-TAC

Wolfgang Brandner: Mitglied in: Calar Alto TAC, Calar-Alto-Instrumentierungskomitee, SPITZER Space Telescope Cycle 1 Proposal Review Panel, MPIA Vertreter der Mitarbeiter in der CPT-Sektion der MPG; Studenten-Auswahlkomitee des MPIA, PhD Committee for Herve Bouy

Josef Fried: Mitglied des Calar-Alto-Instrumentierungskomitees

Roland Gredel: Calar Alto Programme Committee; Junta de Andalucia, Arbeitsgruppe zu einem Gesetz gegen Lichtverschmutzung; LBT operations advisory committee;

Thomas Henning: Mitglied des Scientific and Technical Committee der ESO; Mitglied der ESO Strategic Planning Group; Mitglied des VLTI Implementation Committee; Mitglied im ESO-VLT-Instrument Science Team für VISIR; Mitglied der Astronomy Working Group der ESA; Mitglied im SOFIA Science Council; Mitglied des European ALMA Board; Vorsitzender des German Interferometry Centre FRINGE; Präsident des Science Council der European Interferometry Initiative; Vorsitzender der LBT-Beteiligungsgesellschaft; Mitglied Board of Directors LBT Corporation; Mitglied Executive Committee CAHA; Berufungskommission C3 „Theoretische Astrophysik“, Universität Heidelberg; Mitglied im DLR-Gutachterausschuss „Extraterrestrische Grundlagenforschung“; Stellvertretender Vorsitzender des wissenschaftlichen Beirats des Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik, Freiburg; Co-I of the infrared instruments FIFI-LS (SOFIA), PACS (HERSCHEL), MIRI (JWST), CHEOPS (VLT), PRIMA-DDL (VLTI); Mitglied der AG (Astronomische Gesellschaft) und der DPG (Deutsche Physikalische Gesellschaft); Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina.

Tom Herbst: LBT Science Advisory Committee (chair); LBT Board (attendance as SAC Chair); ESA-DARWIN

Terrestrial Exo-planet Science Advisory Team (TE-SAT); ESA-DARWIN GENIE Advisory Team; MPIA WBK; MPIA PhD Advisory Committee; MPIA Computer Committee

Ulrich Klaas: Co-Investigator im ISOPHOT-Konsortium; Co-Investigator im HERSCHEL-PACS-Konsortium; Mitglied des ISO Active Archive Phase Coordination Committee; Mitglied der HERSCHEL Calibration Steering Group; Mitglied der MIRI EC Calibration Working Group; Mitglied im Bibliotheksausschuss

Martin Kürster: Member of IAU Working Group »Extrasolar Planets«

Klaus Meisenheimer: Mitglied des Calar-Alto-Instrumentierungskomitees

Christoph Leinert: ESO OPC Panel member

Dietrich Lemke: Principal Investigator im ISO-ISOPHOT Konsortium; Co-Investigator im HERSCHEL-PACS-Konsortium; Co-Principal Investigator des JWST-MIRI-Konsortiums

Hans-Walter Rix: Vorsitzender des wissenschaftlichen Beirats des Astronomischen Instituts Potsdam (AIP); Mitglied im Kuratorium des Astronomischen Instituts Potsdam (AIP); Mitglied im Fachbeirat des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg (ARI); Mitglied im ESO Visiting Committee; Mitglied im Board der Large Binocular Telescope Corporation (LBT) und im Board der Large Binocular Telescope Beteiligungsgesellschaft (LBTB); Mitglied im Board von OPTICON; Mitglied im VLTI Steering Committee; Mitglied im SIRTf Time Allocation Committee (TAC) und SIRTf Proposal Review Panel; Mitglied im JWST/NIRSPEC Science Team; Mitglied in der MPG-Kommission SNWG; Mitglied im BMBF-Gutachterausschuss »Astrophysik und Astroteilchenphysik«; Mitglied im DFG Emmy-Noether Panel

Hermann-Josef Röser: Secretary of the Calar Alto Time Allocation Committee; Allocation of MPG-time at ESO/MPG 2.2-m-telescope (with Rainer Lenzen)

Ralf Launhardt, Eva Schinnerer: Mitglieder des Ernst-Patzer-Preiskomitees

Jakob Staude: Mitglied der Jury beim Bundeswettbewerb »Jugend forscht«

Weitere Aktivitäten am Institut

Klaus Meisenheimer, zusammen mit Ulrich Bastian (ARI) und Michael Biermann (LSW), und mit der Unterstützung von Stephan Birkmann, Monika Maintz, Holger Mandel und Nadine Häring, führte vom 16.–20. Februar erstmals das BOGY-Praktikum zur »Berufs-Orientierung an Gymnasien« durch.

Sebastian Wolf initiierte das Programm »Miniforschung«, das den Studenten der unteren Semester (ab Vordiplom) Gelegenheit gibt, innerhalb der Arbeitsgruppen am Institut schon frühzeitig mit moderner astrophysikalischer Forschung in Kontakt zu kommen, und organisiert es seither. Innerhalb der »Miniforschung« begonnene Arbeiten können gegebenenfalls im Rahmen einer Diplomarbeit weitergeführt werden.

Reinhard Mundt und Hans-Walter Rix initiierten die »International Max Planck Research School for Astronomy & Cosmic Physics at the University of Heidelberg«

Am 8. Juni führte die SuW-Redaktion, unterstützt durch Stefan Birkmann, Sebastian Egner, Nadine Häring, Boris Häussler, Bernhard Keil, Stephan Kellner, Ernest Krmpotic, Jens Rodmann, Marc Schartmann u. Oliver Schütz im Schwetzingen Schlossgarten eine öffentliche Beobachtung des Venustransits durch. Zahlreiche Schulklassen und allgemeines Publikum (insgesamt ca. 1500 Personen) besuchten das Ereignis historischer Kulisse.

Durch das Institut in Heidelberg wurden 16 Besuchergruppen mit insgesamt 450 Teilnehmern geführt. (Axel M. Quetz, Stephan Kellner u.a.)

Auf dem Calar Alto wurden ca. 2000 Besucher, davon etwa 70 Prozent spanische Schulklassen und etwa 20 Prozent öffentliche spanische Organisationen und Institutionen durch das Observatorium geführt.

Jakob Staude, unterstützt von Axel M. Quetz, gestaltete den 43. Jahrgang der Zeitschrift »Sterne und Weltraum«.

Veröffentlichungen

In Zeitschriften mit Referierungs-System

Abazajian, K., J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, S. S. Allam, K. Anderson, S. J. , S. F. Anderson, J. Annis, N. A. Bahcall, I. K. Baldry, S. Bastian, A. Berlind, M. Bernardi, M. R. Blanton, J. J. Bochanski, Jr. , W. N. Boroski, J. W. Briggs, J. Brinkmann, R. J. Brunner, T. Budavári, L. N. Carey, S. Carliles, F. J. Castander, A. J. Connolly, I. Csabai, M. Doi, F. Dong, D. J. Eisenstein, M. L. Evans, X. Fan, D. P. Finkbeiner, S. D. Friedman, J. A. Frieman, M. Fukugita, R. R. Gal, B. Gillespie, K. Glazebrook, J. Gray, E. K. Grebel, J. E. Gunn, V. K. Gurbani, P. B. Hall, M. Hamabe, F. H. Harris, H. C. Harris, M. Harvanek, T. M. Heckman, J. S. Hendry, G. S. Hennessy, R. B. Hindsley, C. J. Hogan, D. W. Hogg, D. J. Holmgren, S.-i. Ichikawa, T. Ichikawa, Z. Ivezic, S. Jester, D. E. Johnston, A. M. Jorgensen, S. M. Kent, S. J. Kleinman, G. R. Knapp, A. Y. Kniazev, R. G. Kron, J. Krzesinski, P. Z. Kunszt, N. Kuropatkin, D. Q. Lamb, H. Lampeitl, B. C. Lee, R. F. Leger, N. Li, H. Lin, Y.-S. Loh, D. C. Long, J. Loveday, R. H. Lupton, T. Malik, B. Margon, T. Matsubara, P. M. McGehee, T. A. McKay, A. Meiksin, J. A. Munn, R. Nakajima, T. Nash, E. H. Neilsen, Jr. , H. J. Newberg, P. R. Newman, R. C. Nichol, T. Nicinski, M. Nieto-Santisteban, A. Nitta, S. Okamura, W. O'Mullane, J. P. Ostriker, R. Owen, N. Padmanabhan, J. Peoples, J. R. Pier, A. C. Pope, T. R. Quinn, G. T. Richards, M. W. Richmond, H.-W. Rix, C. M. Rockosi, D. J. Schlegel, D. P. Schneider, R. Scranton, M. Sekiguchi, U. Seljak, G. Sergey, B.

Sesar, E. Sheldon, K. Shimasaku, W. A. Siegmund, N. M. Silvestri, J. A. Smith, V. Smolcic, S. A. Snedden, A. Stebbins, C. Stoughton, M. A. Strauss, M. SubbaRao, A. S. Szalay, I. Szapudi, P. Szkody, G. P. Szokoly, M. Tegmark, L. Teodoro, A. R. Thakar, C. Tremonti, D. L. Tucker, A. Uomoto, D. E. Vanden Berk, J. Vandenberg, M. S. Vogeley, W. Voges, N. P. Vogt, L. M. Walkowicz, S.-i. Wang, D. H. Weinberg, A. A. West, S. D. M. White, B. C. Wilhite, Y. Xu, B. Yanny, N. Yasuda, C.-W. Yip, D. R. Yocum, D. G. York, I. Zehavi, S. Zibetti, D. B. Zucker: The second data release of the Sloan Digital Sky Survey. *The Astronomical Journal* 128, 502-512 (2004)

Alvarez, C., M. Feldt, T. Henning, E. Puga, W. Brandner, B. Stecklum: Near-Infrared subarcsecond observations of ultracompact H II regions. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 155, 123-148 (2004)

Alvarez, C., M. Hoare, A. Glindemann, A. Richichi: Near-IR speckle imaging of massive young stellar objects. *Astronomy and Astrophysics* 427, 505-518 (2004)

Alvarez, C., M. Hoare, P. Lucas: Constraints in the circumstellar density distribution of massive young stellar objects. *Astronomy and Astrophysics* 419, 203-213 (2004)

Amans, D., S. Callard, A. Gagnaire, J. J., F. Huysen, G. Ledoux: Spectral and spatial narrowing of the emission of silicon nanocrystals in a microcavity. *Journal of Applied Physics* 95, 5010-5013 (2004)

Apai, D., I. Pascucci, W. Brandner, T. Henning, R. Lenzen, D. E. Potter, A.-M. Lagrange, G. Rousset: NACO pola-

- rimetric differential imaging of TW Hya. A sharp look at the closest T Tauri disk. *Astronomy and Astrophysics* 415, 671-676 (2004)
- Apai, D., I. Pascucci, M. F. Sterzik, N. van der Blik, J. Bouwman, C. P. Dullemond, T. Henning: Grain growth and dust settling in a brown dwarf disk. Gemini/T-ReCs observations of CFHT-BD-Tau 4. *Astronomy and Astrophysics* 426, L53-L57 (2004)
- Avila, R., E. Masciadri, J. Vernin, L. J. Sánchez: Generalized SCIDAR measurements at San Pedro Mártir. I Turbulence profile statistics. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 116, 682-692 (2004)
- Bailer-Jones, C. A. L.: Spectroscopic rotation velocities of L dwarfs from VLT/UVES and their comparison with periods from photometric monitoring. *Astronomy and Astrophysics* 419, 703-712 (2004)
- Bailer-Jones, C. A. L.: Evolutionary design of photometric systems and its application to GAIA. *Astronomy and Astrophysics* 419, 385-403 (2004)
- Bell, E. F., D. H. McIntosh, M. Barden, C. Wolf, J. A. R. Caldwell, H.-W. Rix, S. V. W. Beckwith, A. Borch, B. Häussler, K. Jahnke, S. Jogee, K. Meisenheimer, C. Peng, S. F. Sanchez, R. S. Somerville, L. Wisotzki: GEMS imaging of red-sequence galaxies at $z \sim 0.7$: Dusty or old? *The Astrophysical Journal* 600, L11-L14 (2004)
- Bell, E. F., C. Wolf, K. Meisenheimer, H.-W. Rix, A. Borch, S. Dye, M. Kleinheinrich, L. Wisotzki, D. H. McIntosh: Nearly 5000 distant early-type galaxies in COMBO-17: A red sequence and its evolution since $z \sim 1$. *The Astrophysical Journal* 608, 752-767 (2004)
- Bhaskara Rao, S. V. N., A. P. Mishra, R. D'Souza, T. K. Balasubramanian: Rovibrational matrix elements of polarizability of HD, HT and DT molecules [rapid communication]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 87, 203-210 (2004)
- Boattini, A., G. D'Abramo, H. Scholl, O. R. Hainaut, H. Boehnhardt, R. West, M. Carpino, G. Hahn, R. Michelsen, G. Forti, P. Pravec, G. B. Valsecchi, D. J. Asher: Near Earth Asteroid search and follow-up beyond 22nd magnitude. A pilot program with ESO telescopes. *Astronomy and Astrophysics* 418, 743-750 (2004)
- Boehnhardt, H., S. Bagnulo, K. Muinonen, M. A. Barucci, L. Kolokolova, E. Dotto, G. P. Tozzi: Surface characterization of 28978 Ixion (2001 KX76). *Astronomy and Astrophysics* 415, L21-L25 (2004)
- Böker, T., M. Sarzi, D. E. McLaughlin, R. P. van der Marel, H.-W. Rix, L. C. Ho, J. C. Shields: A HUBBLE Space Telescope census of nuclear star clusters in late-type spiral galaxies. II. Cluster sizes and structural parameter correlations. *The Astronomical Journal* 127, 105-118 (2004)
- Bouy, H., W. Brandner, E. Martin, X. Delfosse, F. Allard, I. Baraffe, T. Forveille, R. Demarco: A young binary brown dwarf in the R-CrA star forming region. *Astronomy and Astrophysics* 424, 213-226 (2004)
- Bouy, H., G. Duchêne, R. Köhler, W. Brandner, J. Bouvier, E. L. Martín, A. Ghez, X. Delfosse, T. Forveille, F. Allard, I. Baraffe, G. Basri, L. Close, C. E. McCabe: First determination of the dynamical mass of a binary L dwarf. *Astronomy and Astrophysics* 423, 341-352 (2004)
- Brandner, W., E. L. Martín, H. Bouy, R. Köhler, X. Delfosse, G. Basri, M. Andersen: Astrometric monitoring of the binary brown dwarf DENIS-P J1228.2-1547. *Astronomy and Astrophysics* 428, 205-208 (2004)
- Burns, C. R., C. C. Dyer, P. P. Kronberg, H.-J. Röser: Theoretical modeling of weakly lensed polarized radio sources. *The Astrophysical Journal* 613, 672-681 (2004)
- Butler, D. J.: RR Lyrae stars in the outer region of the globular cluster M 3: A shortage of long periods at $r \sim 3.5$ to 6 arcmin? *Astronomy and Astrophysics* 420, 213-215 (2004)
- Butler, D. J., S. Hippler, S. Egner, W. Xu, J. Bähr: Broadband, static wave-front generation: Na-Ag Ion-exchange phase screens and telescope emulation. *Applied Optics* 43, 2813-2823 (2004)
- Butler, D. J., D. Martínez-Delgado, W. Brandner: The stellar content and star formation history of the late-type spiral galaxy NGC 300 from HUBBLE Space Telescope observations. *The Astronomical Journal* 127, 1472-1485 (2004)
- Christou, J. C., G. Pugliese, R. Köhler, J. D. Drummond: Photometric and astrometric analysis of Gemini/Hokupa'a Galactic Center Adaptive Optics Observations. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 116, 734-744 (2004)
- Colder, A., F. Huisken, E. Trave, G. Ledoux, O. Guillois, C. Reynaud, H. Hofmeister, E. Pippel: Strong visible photoluminescence from hollow silica nanoparticles. *Nanotechnology* 15, L1-L4 (2004)
- Colder, A., F. Huisken, E. Trave, G. Ledoux, O. Guillois, C. Reynaud, H. Hofmeister, E. Pippel: Letter to the editor: Strong visible photoluminescence from hollow silica nanoparticles. *Nanotechnology* 15, L1-L4 (2004)
- Coleman, M., G. S. Da Costa, J. Bland-Hawthorn, D. Martínez-Delgado, K. C. Freeman, D. Malin: Shell structure in the fornax dwarf spheroidal galaxy. *The Astronomical Journal* 127, 832-839 (2004)
- Contini, M., S. M. Viegas, M. A. Prieto: The infrared continuum of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 348, 1065-1077 (2004)
- de Bergh, C., H. Boehnhardt, M. A. Barucci, M. Lazzarin, S. Fornasier, J. Romon-Martin, G. P. Tozzi, A. Doressoundiram, E. Dotto: Aqueous altered silicates at the surface of two Plutinos? *Astronomy and Astrophysics* 416, 791-798 (2004)
- Dehnen, W., M. Odenkirchen, E. K. Grebel, H.-W. Rix: Modeling the disruption of the globular cluster Palomar 5 by galactic tides. *The Astronomical Journal* 127, 2753-2770 (2004)
- Delsanti, A., O. Hainaut, E. Jourdeuil, K. J. Meech, H. Boehnhardt, L. Barrera: Simultaneous visible-near IR photometric study of Kuiper Belt Object surfaces with the ESO/Very Large Telescopes. *Astronomy and Astrophysics* 417, 1145-1158 (2004)

- Dib, S., A. Burkert: The origin of the H I holes in the interstellar medium of Holmberg II. *Astrophysics and Space Science* 292, 135-140 (2004)
- Dib, S., A. Burkert, A. Hujeirat: On the thermal instability in numerical models of the interstellar medium. *Astrophysics and Space Science* 289, 465-468 (2004)
- Dirsch, B., T. Richtler, D. Geisler, K. Gebhardt, M. Hilker, M. V. Alonso, J. C. Forte, E. K. Grebel, L. Infante, S. Larsen, D. Minniti, M. Rejkuba: The globular cluster system of NGC 1399. III. VLT spectroscopy and database. *The Astronomical Journal* 127, 2114-2132 (2004)
- Doherty, M., A. Bunker, R. Sharp, G. Dalton, I. Parry, I. Lewis, E. MacDonald, C. Wolf, H. Hippelein: Multi-object near-infrared Ha spectroscopy of $z \sim 1$ star-forming galaxies in the HUBBLE Deep Field North. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 354, L7-L12 (2004)
- Finkbeiner, D. P., N. Padmanabhan, D. J. Schlegel, M. A. Carr, J. E. Gunn, C. M. Rockosi, M. Sekiguchi, R. H. Lupton, G. R. Knapp, Z. Ivezić, M. R. Blanton, D. W. Hogg, J. K. Adelman-McCarthy, J. Annis, J. Hayes, E. Kinney, D. C. Long, U. Seljak, M. A. Strauss, B. Yanny, M. A. Agüeros, S. S. Allam, S. F. Anderson, N. A. Bahcall, I. K. Baldry, M. Bernardi, W. N. Boroski, J. W. Briggs, J. Brinkmann, R. J. Brunner, T. Budavári, F. J. Castander, K. R. Covey, I. Csabai, M. Doi, F. Dong, D. J. Eisenstein, X. Fan, S. D. Friedman, M. Fukugita, B. Gillespie, E. K. Grebel, V. K. Gurbani, E. de Haas, F. H. Harris, J. S. Hendry, G. S. Hennessy, S. Jester, D. E. Johnston, A. M. Jorgensen, M. Juric, S. M. Kent, A. Y. Kniazev, J. Krzesinski, R. F. Leger, H. Lin, J. Loveday, E. Mannery, D. Martínez-Delgado, P. M. McGehee, A. Meiksin, J. A. Munn, E. H. Neilsen, Jr., P. R. Newman, A. Nitta, G. Pauls, T. R. Quinn, R. R. Rafikov, G. T. Richards, M. W. Richmond, D. P. Schneider, J. Schroeder, K. Shimasaku, W. A. Siegmund, J. A. Smith, S. A. Snedden, A. Stebbins, A. S. Szalay, G. P. Szokoly, M. Tegmark, D. L. Tucker, A. Uomoto, D. E. Vanden Berk, D. H. Weinberg, A. A. West, N. Yasuda, D. R. Yocum, D. G. York, I. Zehavi: Sloan Digital Sky Survey Imaging of Low Galactic Latitude Fields: Technical Summary and Data Release. *The Astronomical Journal* 128, 2577-2592 (2004)
- Forbrich, J., K. Schreyer, B. Posselt, R. Klein, T. Henning: An extremely young massive stellar object near IRAS 07029-1215. *The Astrophysical Journal* 602, 843-849 (2004)
- Fornasier, S., A. Doressoundiram, G. P. Tozzi, M. A. Barucci, H. Boehnhardt, C. de Bergh, A. Delsanti, J. Davies, E. Dotto: ESO Large Program on physical studies of Trans-Neptunian objects and Centaurs: Final results of the visible spectrophotometric observations. *Astronomy and Astrophysics* 421, 353-363 (2004)
- Fornasier, S., E. Dotto, F. Marzari, M. A. Barucci, H. Boehnhardt, O. Hainaut, C. de Bergh: Visible spectroscopic and photometric survey of L5 Trojans: investigation of dynamical families. *Icarus* 172, 221-232 (2004)
- Förster Schreiber, N. M., P. G. van Dokkum, M. Franx, I. Labbé, G. Rudnick, E. Daddi, G. D. Illingworth, M. Kriek, A. F. M. Moorwood, H.-W. Rix, H. Röttgering, I. Trujillo, P. van der Werf, L. van Starkenburg, S. Wuyts: A substantial population of red galaxies at $z > 2$: Modeling of the spectral energy distributions of an extended sample. *The Astrophysical Journal* 616, 40-62 (2004)
- Gallart, C., A. Aparicio, W. L. Freedman, B. F. Madore, D. Martínez-Delgado, P. B. Stetson: The variable-star population in Phoenix: Coexistence of anomalous and short-period classical Cepheids and detection of RR Lyrae variables. *The Astronomical Journal* 127, 1486-1501 (2004)
- García-Berro, E., S. Torres, J. Isern, A. Burkert: Monte Carlo simulations of the halo white dwarf population. *Astronomy and Astrophysics* 418, 53-65 (2004)
- Girardi, L., E. K. Grebel, M. Odenkirchen, C. Chiosi: Theoretical isochrones in several photometric systems. II. The Sloan Digital Sky Survey ugriz system. *Astronomy and Astrophysics* 422, 205-215 (2004)
- Gouliermis, D., S. C. Keller, M. Kontizas, E. Kontizas, I. Bellas-Velidis: Mass segregation in young Magellanic Cloud star clusters: Four clusters observed with HST. *Astronomy and Astrophysics* 416, 137-155 (2004)
- Grady, C. A., B. Woodgate, C. A. O. Torres, T. Henning, D. Apai, J. Rodmann, H. Wang, B. Stecklum, H. Linz, G. M. Williger, A. Brown, E. Wilkinson, G. M. Harper, G. J. Herczeg, A. Danks, G. L. Vieira, E. Malumuth, N. R. Collins, R. S. Hill: The environment of the optically brightest Herbig Ae Star, HD 104237. *The Astrophysical Journal* 608, 809-830 (2004)
- Gray, M. E., C. Wolf, K. Meisenheimer, A. Taylor, S. Dye, A. Borch, M. Kleinheinrich: Linking star formation and environment in the A901/902 supercluster. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 347, L73-L77 (2004)
- Gredel, R.: Interstellar absorption lines toward Cep OB4. *Astronomy and Astrophysics* 425, 151-162 (2004)
- Guillois, O., N. Herlin-Boime, C. Reynaud, G. Ledoux, F. Huisken: Photoluminescence decay dynamics of noninteracting silicon nanocrystals. *Journal of Applied Physics* 95, 3677-3682 (2004)
- Gutiérrez, C. M., I. Trujillo, J. A. L. Aguerri, A. W. Graham, N. Caon: Quantitative morphology of galaxies in the core of the Coma cluster. *The Astrophysical Journal* 602, 664-677 (2004)
- Haas, M., S. A. H. Müller, F. Bertoldi, R. Chini, S. Egner, W. Freudling, U. Klaas, O. Krause, D. Lemke, K. Meisenheimer, R. Siebenmorgen, I. van Bremmel: The ISOPHOT-MAMBO survey of 3CR radio sources: Further evidence for the unified schemes. *Astronomy and Astrophysics* 424, 531-543 (2004)
- Häring, N., H.-W. Rix: On the black hole mass-bulge mass relation. *The Astrophysical Journal* 604, L89-L92 (2004)
- Hartung, M., T. M. Herbst, L. M. Close, R. Lenzen, W. Brandner, O. Marco, C. Lidman: A new VLT surface map of Titan at 1.575 microns. *Astronomy and Astrophysics* 421, L17-L20 (2004)

- Héraudeau, P., S. Oliver, C. del Burgo, C. Kiss, M. Stickel, T. G. Müller, M. Rowan-Robinson, A. Efstathiou, C. Surace, L. V. Tóth, S. Serjeant, A. Franceschini, D. Lemke, I. Perez-Fournon, J.-L. Puget, D. Rigopoulou, B. Rocca-Volmerange, A. Verma: The European Large Area ISO Survey. VIII. 90 mm final analysis and source counts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 354, 924-934 (2004)
- Heymans, C., M. Brown, A. Heavens, K. Meisenheimer, A. Taylor, C. Wolf: Weak lensing with COMBO-17: Estimation and removal of intrinsic alignments. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 347, 895-908 (2004)
- Hogg, D. W., M. R. Blanton, J. Brinchmann, D. J. Eisenstein, D. J. Schlegel, J. E. Gunn, T. A. McKay, H.-W. Rix, N. A. Bahcall, J. Brinkmann, A. Meiksin: The dependence on environment of the color-magnitude relation of galaxies. *The Astrophysical Journal* 601, L29-L32 (2004)
- Huang, J.-S., P. Barmby, G. G. Fazio, S. P. Willner, G. Wilson, D. Rigopoulou, A. Alonso-Herrero, H. Dole, E. Egami, E. Le Floch, C. Papovich, P. G. Pérez-González, J. Rigby, C. W. Engelbracht, K. Gordon, D. Hines, M. Rieke, G. H. Rieke, K. Meisenheimer, S. Miyazaki: Infrared Array Camera (IRAC) imaging of the Lockman Hole. *Astrophysical Journal Supplement Series* 154, 44-47 (2004)
- Ilgner, M., T. Henning, A. J. Markwick, T. J. Millar: Transport processes and chemical evolution in steady accretion disk flows. *Astronomy and Astrophysics* 415, 643-659 (2004)
- Iye, M., H. Kuroji, H. Ando, N. Kaifu, K. Kodaira, K. Aoki, W. Aoki, Y. Chikada, Y. Doi, N. Ebizuka, B. Elms, G. Fujihara, H. Furusawa, T. Fuse, W. Gaessler, S. Harasawa, Y. Hayano, M. Hayashi, S. Hayashi, S. Ichikawa, M. Imanishi, C. Ishida, Y. Kamata, T. Kanzawa, N. Kashikawa, K. Kawabata, N. Kobayashi, Y. Komiyama, G. Kosugi, T. Kurakami, M. Letawsky, Y. Mikami, A. Miyashita, S. Miyazaki, Y. Mizumoto, J. Morino, K. Motohara, K. Murakawa, M. Nakagiri, K. Nakamura, H. Nakaya, K. Nariai, T. Nishimura, K. Noguchi, T. Noguchi, T. Noumaru, R. Ogasawara, N. Ohshima, Y. Ohya, K. Okita, K. Omata, M. Otsubo, S. Oya, R. Potter, Y. Saito, T. Sasaki, S. Sato, D. Scarla, K. Schubert, K. Sekiguchi, M. Sekiguchi, I. Shelton, C. Simpson, H. Suto, A. Tajitsu, H. Takami, T. Takata, N. Takato, R. Tamae, M. Tamura, W. Tanaka, H. Terada, Y. Torii, F. Uraguchi, T. Usuda, M. Weber, T. Winegar, M. Yagi, T. Yamada, T. Yamashita, Y. Yamashita, N. Yasuda, M. Yoshida, M. Yutani: Current performance and on-going improvements of the 8.2 m Subaru Telescope. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 56, 381-397 (2004)
- Jaffe, W., K. Meisenheimer, H. J. A. Röttgering, C. Leinert, A. Richichi, O. Chesneau, D. Fraix-Burnet, A. Glazeborg-Kluttig, G.-L. Granato, U. Graser, B. Heijligers, R. Köhler, F. Malbet, G. K. Miley, F. Paresce, J.-W. Pel, G. Perrin, F. Przygodda, M. Schoeller, H. Sol, L. B. F. M. Waters, G. Weigelt, J. Woillez, P. T. de Zeeuw: The central dusty torus in the active nucleus of NGC 1068. *Nature* 429, 47-49 (2004)
- Jahnke, K., S. F. Sánchez, L. Wisotzki, M. Barden, S. Beckwith, E. Bell, A. Borch, J. Caldwell, B. Häußler, S. Jogee, D. H. McIntosh, K. Meisenheimer, C. Y. Peng, H.-W. Rix, R. S. Somerville, C. Wolf: Ultraviolet light from young stars in GEMS quasar host galaxies at $1.8 < z < 2.75$. *The Astrophysical Journal* 614, 568-585 (2004)
- Jogee, S., F. D. Barazza, H.-W. Rix, I. Shlosman, M. Barden, C. Wolf, J. Davies, I. Heyer, S. V. W. Beckwith, E. F. Bell, A. Borch, J. A. R. Caldwell, C. J. Conselice, T. Dahlen, B. Häussler, C. Heymans, K. Jahnke, J. H. Knapen, S. Laine, G. M. Lubell, B. Mobasher, D. H. McIntosh, K. Meisenheimer, C. Y. Peng, S. Ravindranath, S. F. Sanchez, R. S. Somerville, L. Wisotzki: Bar evolution over the last 8 billion years: A constant fraction of strong bars in the GEMS survey. *The Astrophysical Journal* 615, L105-L108 (2004)
- Khanzadyan, T., R. Gredel, M. D. Smith, T. Stanke: An unbiased search for the signatures of protostars in the Ophiuchi A molecular cloud: I. Near-infrared observations. *Astronomy and Astrophysics* 426, 171-183 (2004)
- Khanzadyan, T., M. D. Smith, C. J. Davis, T. Stanke: An excitation study of bow shocks driven from protostars in S233IR. *Astronomy and Astrophysics* 418, 163-176 (2004)
- Kiss, C., A. Moór, L. V. Tóth: Far-infrared loops in the 2nd Galactic Quadrant. *Astronomy and Astrophysics* 418, 131-141 (2004)
- Klahr, H.: The global baroclinic instability in accretion disks. II. Local linear analysis. *The Astrophysical Journal* 606, 1070-1082 (2004)
- Kniazev, A. Y., E. K. Grebel, S. A. Pustilnik, A. G. Pramskij, T. F. Kniazeva, F. Prada, D. Harbeck: Low surface brightness galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. I. Search method and test sample. *The Astronomical Journal* 127, 704-727 (2004)
- Kniazev, A. Y., S. A. Pustilnik, E. K. Grebel, H. Lee, A. G. Pramskij: Strong emission line H II galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. I. Catalog of DR1 objects with oxygen abundances from Te measurements. *Astrophysical Journal Supplement Series* 153, 429-445 (2004)
- Koch, A., E. K. Grebel, M. Odenkirchen, D. Martínez-Delgado, J. A. R. Caldwell: Mass Segregation in the Globular Cluster Palomar 5 and its Tidal Tails. *The Astronomical Journal* 128, 2274-2287 (2004)
- Koch, A., M. Odenkirchen, E. K. Grebel, J. A. R. Caldwell: A calibration map for Wide Field Imager photometry. *Astronomische Nachrichten* 325, 299-306 (2004)
- Köhler, R., M. Kunkel, C. Leinert, H. Zinnecker: T Tauri stars in the Sco-Cen OB association. *VizieR Online Data Catalog* 335, 60541 (2004)
- Könyves, V., A. Moor, C. Kiss, P. Abraham: Young stellar objects in L1188. *Baltic Astronomy* 13, 470-473 (2004)
- Krause, O., S. M. Birkmann, G. H. Rieke, D. Lemke, U. Klaas, D. C. Hines, K. D. Gordon: No cold dust within

- the supernova remnant Cassiopeia A. *Nature* 432, 596-598 (2004)
- Lamm, M. H., C. A. L. Bailer-Jones, R. Mundt, W. Herbst, A. Scholz: A rotational and variability study of a large sample of PMS stars in NGC 2264. *Astronomy and Astrophysics* 417, 557-581 (2004)
- Lara, L.-M., R. Rodrigo, G. P. Tozzi, H. Boehnhardt, P. Leisy: The gas and dust coma of Comet C/1999 H1 (Lee). *Astronomy and Astrophysics* 420, 371-382 (2004)
- Lara, L.-M., G. P. Tozzi, H. Boehnhardt, M. DiMartino, R. Schulz: Gas and dust in Comet C/2000 WM1 during its closest approach to Earth: Optical imaging and long-slit spectroscopy. *Astronomy and Astrophysics* 422, 717-729 (2004)
- Lee, B. C., S. S. Allam, D. L. Tucker, J. Annis, D. E. Johnston, R. Scranton, Y. Acebo, N. A. Bahcall, M. Bartelmann, H. Böhringer, N. Ellman, E. K. Grebel, L. Infante, J. Loveday, T. A. McKay, F. Prada, D. P. Schneider, C. Stoughton, A. S. Szalay, M. S. Vogeley, W. Voges, B. Yanny: A catalog of compact groups of galaxies in the SDSS commissioning data. *The Astronomical Journal* 127, 1811-1859 (2004)
- Lehtinen, K., D. Russeil, M. Juvela, K. Mattila, D. Lemke: ISO far infrared observations of the high latitude cloud L 1642 – I: The density and temperature structure. *Astronomy and Astrophysics* 423, 975-982 (2004)
- Leinert, C., R. van Boekel, L. B. F. M. Waters, O. Chesneau, F. Malbet, R. Köhler, W. Jaffe, T. Ratzka, A. Dutrey, T. Preibisch, U. Graser, E. Bakker, G. Chagnon, W. D. Cotton, C. Dominik, C. P. Dullemond, A. W. Glazenborg-Klutzig, A. Glindemann, T. Henning, K.-H. Hofmann, J. de Jong, R. Lenzen, S. Ligi, B. Lopez, J. Meisner, S. Morel, F. Paresce, J.-W. Pel, I. Percheron, G. Perrin, F. Przygodda, A. Richichi, M. Schöller, P. Schuller, B. Stecklum, M. E. van den Ancker, O. von der Lühse, G. Weigelt: Mid-infrared sizes of circumstellar disks around Herbig Ae/Be stars measured with MIDI on the VLTI. *Astronomy and Astrophysics* 423, 537-548 (2004)
- López Martí, B., J. Eisloffel, A. Scholz, R. Mundt: The brown dwarf population in the Chamaeleon I cloud. *Astronomy and Astrophysics* 416, 555-576 (2004)
- MacArthur, L. A., S. Courteau, E. Bell, J. A. Holtzman: Structure of disk-dominated galaxies. II. Color gradients and stellar population models. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 152, 175-199 (2004)
- Maier, C., K. Meisenheimer, H. Hippelein: The metallicity-luminosity relation at medium redshift based on faint CADIS emission line galaxies. *Astronomy and Astrophysics* 418, 475-485 (2004)
- Martínez-Delgado, D., M. Á. Gómez-Flechoso, A. Aparicio, R. Carrera: Tracing out the Northern tidal stream of the Sagittarius dwarf spheroidal galaxy. *The Astrophysical Journal* 601, 242-259 (2004)
- Masciadri, E., R. Avila, L. J. Sánchez: Statistic reliability of the meso-Nh atmospheric model for 3D C[N]2 simulations. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* 40, 3-14 (2004)
- Masciadri, E., M. Feldt, S. Hippler: Scintillation effects on a high-contrast imaging instrument for direct extrasolar planets' detection. *The Astrophysical Journal* 613, 572-579 (2004)
- Masciadri, E., A. Raga: Exoplanet recognition using a wavelet analysis technique. *The Astrophysical Journal* 611, L137-L140 (2004)
- Masciadri, E., A. C. Raga: Looking for outflows from brown dwarfs. *The Astrophysical Journal* 615, 850-854 (2004)
- McCaughrean, M. J., L. M. Close, R.-D. Scholz, R. Lenzen, B. Biller, W. Brandner, M. Hartung, N. Lodieu: ϵ Indi Ba, Bb: The nearest binary brown dwarf. *Astronomy and Astrophysics* 413, 1029-1036 (2004)
- McIntosh, D. H., H.-W. Rix, N. Caldwell: Structural evidence for environment-driven transformation of the blue galaxies in local Abell clusters: A85, A496, and A754. *The Astrophysical Journal* 610, 161-182 (2004)
- Meyer, M. R., L. A. Hillenbrand, D. E. Backman, S. V. W. Beckwith, J. Bouwman, T. Y. Brooke, J. M. Carpenter, M. Cohen, U. Gorti, T. Henning, D. C. Hines, D. Hollenbach, J. S. Kim, J. Lunine, R. Malhotra, E. E. Mamajek, S. Metchev, A. Moro-Martín, P. Morris, J. Najita, D. L. Padgett, J. Rodmann, M. D. Silverstone, D. R. Soderblom, J. R. Stauffer, E. B. Stobie, S. E. Strom, D. M. Watson, S. J. Weidenschilling, S. Wolf, E. Young, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, K. Misselt, J. Morrison, J. Muzerolle, K. Su: The formation and evolution of planetary systems: First results from a SPITZER Legacy Science Program. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 154, 422-427 (2004)
- Morgan, N. D., J. A. R. Caldwell, P. L. Schechter, A. Dressler, E. Egami, H.-W. Rix: WFI J2026-4536 and WFI J2033-4723: Two new quadruple gravitational lenses. *The Astronomical Journal* 127, 2617-2630 (2004)
- Mueller, T. G., M. Sterzik, O. Schütz, P. Pravec, R. Siebenmorgen: Thermal infrared observations of near-Earth asteroid 2002 NY40. *Astronomy and Astrophysics* 424, 1075-1080 (2004)
- Mugrauer, M., R. Neuhauser, E. W. Guenther, A. P. Hatzes, N. Huélamo, M. Fernández, M. Ammler, J. Retzlaff, B. König, D. Charbonneau, R. Jayawardhana, W. Brandner: HD 77407 and GJ 577: Two new young stellar binaries. Detected with the Calar Alto Adaptive Optics system ALFA. *Astronomy and Astrophysics* 417, 1031-1038 (2004)
- Müller, S. H., M. Haas, R. Siebenmorgen, U. Klaas, K. Meisenheimer, R. Chini, M. Albrecht: Dust in 3CR radio galaxies: On the FR1-FR2 difference. *Astronomy and Astrophysics* 426, L29-L32 (2004)
- Murakawa, K., H. Suto, M. Tamura, N. Kaifu, H. Takami, N. Takato, S. Oya, Y. Hayano, W. Gaessler, Y. Kamata: CIAO: Coronagraphic imager with adaptive optics on the Subaru Telescope. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 56, 509-519 (2004)
- Mutschke, H., A. C. Andersen, C. Jäger, T. Henning, A. Braatz: Optical data of meteoritic nano-diamonds from far-ultraviolet to far-infrared wavelengths. *Astronomy and Astrophysics* 423, 983-993 (2004)

- O'Connell, B., M. D. Smith, C. J. Davis, K. W. Hodapp, T. Khanzadyan, T. Ray: A near-infrared study of the bow shocks within the L1634 protostellar outflow. *Astronomy and Astrophysics* 419, 975-990 (2004)
- Oguri, M., N. Inada, C. R. Keeton, B. Pindor, J. F. Hennawi, M. D. Gregg, R. H. Becker, K. Chiu, W. Zheng, S.-I. Ichikawa, Y. Suto, E. L. Turner, J. Annis, N. A. Bahcall, J. Brinkmann, F. J. Castander, D. J. Eisenstein, J. A. Frieman, T. Goto, J. E. Gunn, D. E. Johnston, S. M. Kent, R. C. Nichol, G. T. Richards, H.-W. Rix, D. P. Schneider, E. S. Sheldon, A. S. Szalay: Observations and theoretical implications of the large-separation lensed quasar SDSS J1004+4112. *The Astrophysical Journal* 605, 78-97 (2004)
- Pascucci, I., D. Apai, T. Henning, B. Stecklum, B. Brandl: The hot core-ultracompact HII connection in G10.47+0.03. *Astronomy and Astrophysics* 426, 523-534 (2004)
- Pascucci, I., S. Wolf, J. Steinacker, C. P. Dullemond, T. Henning, G. Niccolini, P. Woitke, B. Lopez: The 2D continuum radiative transfer problem. Benchmark results for disk configurations. *Astronomy and Astrophysics* 417, 793-805 (2004)
- Peixinho, N., H. Boehnhardt, I. Belskaya, A. Doressoundiram, M. A. Barucci, A. Delsanti: ESO large program on Centaurs and TNOs: visible colors-final results. *Icarus* 170, 153-166 (2004)
- Prieto, M. A., K. Meisenheimer, O. Marco, J. Reunanen, M. Contini, Y. Clenet, R. I. Davies, D. Gratadour, T. Henning, U. Klaas, J. Kotilainen, C. Leinert, D. Lutz, D. Rouan, N. Thatte: Unveiling the central pc region of AGN: The Circinus Nucleus in the near-IR with the VLT. *The Astrophysical Journal* 614, 135-141 (2004)
- Puga, E., C. Alvarez, M. Feldt, T. Henning, S. Wolf: AO-assisted observations of G61.48+0.09: Massive star formation at high resolution. *Astronomy and Astrophysics* 425, 543-552 (2004)
- Pustilnik, S., A. Kniazev, A. Pramskij, Y. Izotov, C. Foltz, N. Brosch, J.-M. Martin, A. Ugryumov: HS 0837+4717 – a metal-deficient blue compact galaxy with large nitrogen excess. *Astronomy and Astrophysics* 419, 469-484 (2004)
- Raga, A. C., A. Riera, E. Masciadri, T. Beck, K. H. Böhm, L. Binette: A variable-velocity, precessing jet model for HH 32. *The Astronomical Journal* 127, 1081-1088 (2004)
- Reed, M. D., E. M. Green, K. Callera, I. R. Seitenzahl, B. A. White, E. A. Hyde, M. K. Giovanni, R. Ostensen, A. Bronowska, E. J. Jeffery, O. Cordes, S. Falterer, H. Edelmann, S. Dreizler, S. L. Schuh: Discovery of gravity-mode pulsators among subdwarf B stars: PG 1716+426, the class prototype. *The Astrophysical Journal* 607, 445-450 (2004)
- Rix, H.-W., M. Barden, S. V. W. Beckwith, E. F. Bell, A. Borch, J. A. R. Caldwell, B. Häussler, K. Jahnke, S. Jøgee, D. H. McIntosh, K. Meisenheimer, C. Y. Peng, S. F. Sanchez, R. S. Somerville, L. Wisotzki, C. Wolf: GEMS: Galaxy evolution from morphologies and SEDs. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 152, 163-173 (2004)
- Rouillé, G., S. Krasnokutski, F. Huisken, T. Henning, O. Sukhorukov, A. Staicu: Ultraviolet spectroscopy of pyrene in a supersonic jet and in liquid helium droplets. *Journal of Chemical Physics* 120, 6028-6034 (2004)
- Rowan-Robinson, M., C. Lari, I. Perez-Fournon, E. A. Gonzalez-Solares, F. L. Franca, M. Vaccari, S. Oliver, C. Gruppioni, P. Ciliegi, P. Heraudeau, S. Serjeant, A. Efstathiou, T. Babbedge, I. Matute, F. Pozzi, A. Franceschini, P. Vaisanen, A. Afonso-Luis, D. M. Alexander, O. Almaini, A. C. Baker, S. Basilakos, M. Barden, C. del Burgo, I. Bellas-Velidis, F. Cabrera-Guerra, R. Carballo, C. J. Cesarsky, D. L. Clements, H. Crockett, L. Danese, A. Dapergolas, B. Drolas, N. Eaton, E. Egami, D. Elbaz, D. Fadda, M. Fox, R. Genzel, P. Goldschmidt, J. I. Gonzalez-Serrano, M. Graham, G. L. Granato, E. Hatziminaoglou, U. Herbstmeier, M. Joshi, E. Kontizas, M. Kontizas, J. K. Kotilainen, D. Kunze, A. Lawrence, D. Lemke, M. J. D. Linden-Vornle, R. G. Mann, I. Marquez, J. Masegosa, R. G. McMahon, G. Miley, V. Missoulis, B. Mobasher, T. Morel, H. Norgaard-Nielsen, A. Omont, P. Papadopoulos, J.-L. Puget, D. Rigopoulou, B. Rocca-Volmerange, N. Sedgwick, L. Silva, T. Sumner, C. Surace, B. Vila-Vilaro, P. van Der Werf, A. Verma, L. Vigroux, M. Villar-Martin, C. J. Willott, A. Carraminana, R. Mujica: ELAIS: final band-merged catalogue. *VizieR Online Data Catalog* 735, 11290 (2004)
- Rowan-Robinson, M., C. Lari, I. Perez-Fournon, E. A. Gonzalez-Solares, F. La Franca, M. Vaccari, S. Oliver, C. Gruppioni, P. Ciliegi, P. Héraudeau, S. Serjeant, A. Efstathiou, T. Babbedge, I. Matute, F. Pozzi, A. Franceschini, P. Vaisanen, A. Afonso-Luis, D. M. Alexander, O. Almaini, A. C. Baker, S. Basilakos, M. Barden, C. del Burgo, I. Bellas-Velidis, F. Cabrera-Guerra, R. Carballo, C. J. Cesarsky, D. L. Clements, H. Crockett, L. Danese, A. Dapergolas, B. Drolas, N. Eaton, E. Egami, D. Elbaz, D. Fadda, M. Fox, R. Genzel, P. Goldschmidt, J. I. Gonzalez-Serrano, M. Graham, G. L. Granato, E. Hatziminaoglou, U. Herbstmeier, M. Joshi, E. Kontizas, M. Kontizas, J. K. Kotilainen, D. Kunze, A. Lawrence, D. Lemke, M. J. D. Linden-Vornle, R. G. Mann, I. Márquez, J. Masegosa, R. G. McMahon, G. Miley, V. Missoulis, B. Mobasher, T. Morel, H. Norgaard-Nielsen, A. Omont, P. Papadopoulos, J.-L. Puget, D. Rigopoulou, B. Rocca-Volmerange, N. Sedgwick, L. Silva, T. Sumner, C. Surace, B. Vila-Vilaro, P. van der Werf, A. Verma, L. Vigroux, M. Villar-Martin, C. J. Willott, A. Carraminana, R. Mujica: The European Large-Area ISO Survey (ELAIS): the final band-merged catalogue. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 351, 1290-1306 (2004)
- Sabbadin, F., M. Turatto, E. Cappellaro, S. Benetti, R. Ragazzoni: The 3-D ionization structure and evolution of NGC 7009 (Saturn Nebula). *Astronomy and Astrophysics* 416, 955-981 (2004)
- Sánchez, S. F., K. Jahnke, L. Wisotzki, D. H. McIntosh, E. Bell, M. Barden, S. Beckwith, A. Borch, J. Caldwell, B. Häußler, S. Jøgee, K. Meisenheimer, C. Y. Peng,

- H. W. Rix, R. S. Somerville, C. Wolf: Colors of AGN host galaxies at $0.5 < z < 1.1$ from GEMS Survey. *The Astrophysical Journal* 614, 586-606 (2004)
- Schirmer, M., T. Erben, P. Schneider, C. Wolf, K. Meisenheimer: GaBoDS: The Garching-Bonn Deep Survey. II. Confirmation of EIS cluster candidates by weak gravitational lensing. *Astronomy and Astrophysics* 420, 75-78 (2004)
- Schräpler, R., T. Henning: Dust diffusion, sedimentation, and gravitational instabilities in protoplanetary disks. *The Astrophysical Journal* 614, 960-978 (2004)
- Schütz, O., H. Bönnhardt, E. Pantin, M. Sterzik, S. Els, J. Hahn, T. Henning: A search for circumstellar dust disks with ADONIS. *Astronomy and Astrophysics* 424, 613-618 (2004)
- Schütz, O., M. Nielbock, S. Wolf, T. Henning, S. Els: SIMBA's view of the ϵ Eri disk. *Astronomy and Astrophysics* 414, L9-L12 (2004)
- Semenov, D., D. Wiebe, T. Henning: Reduction of chemical networks. II. Analysis of the fractional ionisation in protoplanetary discs. *Astronomy and Astrophysics* 417, 93-106 (2004)
- Setiawan, J., L. Pasquini, L. da Silva, A. P. Hatzes, O. von der Lühse, L. Girardi, J. R. de Medeiros, E. Guenther: Precise radial velocity measurements of G and K giants. Multiple systems and variability trend along the Red Giant Branch. *Astronomy and Astrophysics* 421, 241-254 (2004)
- Smith, M. D., G. Pavlovski, M.-M. MacLow, A. Rosen, T. Khanzadyan, R. Gredel, T. Stanke: Molecule destruction and formation in molecular clouds. *Astrophysics and Space Science* 289, 333-336 (2004)
- Staicu, A., G. Rouillé, O. Sukhorukov, T. Henning, F. Huisken: Cavity ring-down laser absorption spectroscopy of jet-cooled anthracene. *Molecular Physics* 20, 1777-1783 (2004)
- Stecklum, B., R. Launhardt, O. Fischer, A. Henden, C. Leinert, H. Meusinger: High-resolution near-infrared observations of the circumstellar disk system in the Bok globule CB 26. *The Astrophysical Journal* 617, 418-424 (2004)
- Steinacker, J., B. Lang, A. Burkert, A. Bacmann, T. Henning: Three-dimensional continuum radiative transfer images of a molecular cloud core evolution. *The Astrophysical Journal* 615, L157-L160 (2004)
- Sterzik, M. F., I. Pascucci, D. Apai, N. van der Bliet, C. P. Dullemond: Evolution of young brown dwarf disks in the mid-infrared. *Astronomy and Astrophysics* 427, 245-250 (2004)
- Stickel, M., D. Lemke, U. Klaas, O. Krause, S. Egner: The ISOPHOT 170 mm Serendipity Survey II. The catalog of optically identified galaxies. *Astronomy and Astrophysics* 422, 39-54 (2004)
- Stickel, M., J. M. van der Hulst, J. H. van Gorkom, D. Schiminovich, C. L. Carilli: First detection of cold dust in the northern shell of NGC 5128 (Centaurus A). *Astronomy and Astrophysics* 415, 95-102 (2004)
- Stolte, A., W. Brandner, B. Brandl, H. Zinnecker, E. K. Grebel: The secrets of the nearest starburst cluster. I. Very Large Telescope/ISAAC photometry of NGC 3603. *The Astronomical Journal* 128, 765-786 (2004)
- Sukhorukov, O., A. Staicu, E. Diegel, G. Rouillé, T. Henning, F. Huisken: D-2 $\leftarrow$ D-0 transition of the anthracene cation observed by cavity ring-down absorption spectroscopy in a supersonic jet. *Chemical Physics Letters* 386, 259-264 (2004)
- Takami, H., N. Takato, Y. Hayano, M. Iye, S. Oya, Y. Kamata, T. Kanzawa, Y. Minowa, M. Otsubo, K. Nakashima, W. Gaessler, D. Saint-Jacques: Performance of Subaru Cassegrain Adaptive Optics System. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 56, 225-234 (2004)
- Taylor, A. N., D. J. Bacon, M. E. Gray, C. Wolf, K. Meisenheimer, S. Dye, A. Borch, M. Kleinheinrich, Z. Kovacs, L. Wisotzki: Mapping the 3D dark matter with weak lensing in COMBO-17. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 353, 1176-1196 (2004)
- Tokunaga, A. T., S. Dahm, W. Gaessler, Y. Hayano, M. Hayashi, M. Iye, T. Kanzawa, N. Kobayashi, Y. Kamata, Y. Minowa, K. Nedachi, S. Oya, T.-S. Pyo, D. Saint-Jacques, H. Terada, H. Takami, N. Takato: H₂ emission nebula associated with KH 15D. *The Astrophysical Journal* 601, L91-L94 (2004)
- Tokunaga, A. T., B. Reipurth, W. Gaessler, Y. Hayano, M. Hayashi, M. Iye, T. Kanzawa, N. Kobayashi, Y. Kamata, Y. Minowa, K. Nedachi, S. Oya, T.-S. Pyo, D. Saint-Jacques, H. Terada, H. Takami, N. Takato: A sub-arcsecond companion to the T Tauri star AS 353B. *The Astronomical Journal* 127, 444-448 (2004)
- Tóth, L. V., M. Haas, D. Lemke, K. Mattila, T. Onishi: Very cold cores in the Taurus Molecular Ring as seen by ISO. *Astronomy and Astrophysics* 420, 533-546 (2004)
- Tozzi, G. P., L. M. Lara, L. Kolokolova, H. Boenhardt, J. Licandro, R. Schulz: Sublimating components in the coma of comet C/2000 WM1 (LINEAR). *Astronomy and Astrophysics* 424, 325-330 (2004)
- Trujillo, I., J. A. L. Aguerri: Quantitative morphological analysis of the HUBBLE Deep Field North and HUBBLE Deep Field South – I. Early- and late-type luminosity-size relations of galaxies out to $z \sim 1$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 355, 82-96 (2004)
- Trujillo, I., A. Burkert, E. F. Bell: The tilt of the fundamental plane: Three-quarters structural nonhomology, one-quarter stellar population. *The Astrophysical Journal* 600, L39-L42 (2004)
- Trujillo, I., P. Erwin, A. A. Ramos, A. W. Graham: Evidence for a new elliptical-galaxy paradigm: Sérsic and core galaxies. *The Astronomical Journal* 127, 1917-1942 (2004)
- Trujillo, I., G. Rudnick, H.-W. Rix, I. Labbé, M. Franx, E. Daddi, P. G. van Dokkum, N. M. Förster Schreiber, K. Kuijken, A. Moorwood, H. Röttgering, A. van de Wel, P. van der Werf, L. van Starkenburg: The luminosity-size and mass-size relations of galaxies out to $z \sim 3$. *The Astrophysical Journal* 604, 521-533 (2004)

- van Boekel, R., M. Min, C. Leinert, L. B. F. M. Waters, A. Richichi, O. Chesneau, C. Dominik, W. Jaffe, A. Dutrey, U. Graser, T. Henning, J. de Jong, R. Köhler, A. de Koter, B. Lopez, F. Malbet, S. Morel, F. Paresce, G. Perrin, T. Preibisch, F. Przygodda, M. Schöller, M. Wittkowski: The building blocks of planets within the 'terrestrial' region of protoplanetary disks. *Nature* 432, 479-482 (2004)
- van der Wel, A., M. Franx, P. G. van Dokkum, H.-W. Rix: The fundamental plane of field early-type galaxies at $z = 1$. *The Astrophysical Journal* 601, L5-L8 (2004)
- van Dokkum, P. G., M. Franx, N. M. Förster Schreiber, G. D. Illingworth, E. Daddi, K. K. Knudsen, I. Labbé, A. Moorwood, H.-W. Rix, H. Röttgering, G. Rudnick, I. Trujillo, P. van der Werf, A. van der Wel, L. van Starkenburg, S. Wuyts: Stellar populations and kinematics of red galaxies at $z > 2$: Implications for the formation of massive galaxies. *The Astrophysical Journal* 611, 703-724 (2004)
- Vazdekis, A., I. Trujillo, Y. Yamada: A correlation between light profile and [Mg/Fe] abundance ratio in early-type galaxies. *The Astrophysical Journal* 601, L33-L36 (2004)
- Verheijen, M. A. W., M. A. Bershad, D. R. Andersen, R. A. Swaters, K. Westfall, A. Kelz, M. M. Roth: The disk mass project; science case for a new PMAS IFU module. *Astronomische Nachrichten* 325, 151-154 (2004)
- Wang, H., D. Apai, T. Henning, I. Pascucci: FU Orionis: A binary star? *The Astrophysical Journal* 601, L83-L86 (2004)
- Wang, H., R. Mundt, T. Henning, D. Apai: Optical outflows in the R CrA molecular cloud. *The Astrophysical Journal* 617, 1191-1203 (2004)
- Wilke, K., U. Klaas, D. Lemke, K. Mattila, M. Stickel, M. Haas: The small Magellanic Cloud in the far infrared. II. Global properties. *Astronomy and Astrophysics* 414, 69-78 (2004)
- Wolf, C., K. Meisenheimer, M. Kleinheinrich, A. Borch, S. Dye, M. Gray, L. Wisotzki, E. F. Bell, H.-W. Rix, A. Cimatti, G. Hasinger, G. Szokoly: A catalogue of the Chandra Deep Field South with multi-colour classification and photometric redshifts from COMBO-17. *Astronomy and Astrophysics* 421, 913-936 (2004)
- Wolf, S., N. V. Voshchinnikov: Mie scattering by ensembles of particles with very large size parameters. *Computer Physics Communications* 162, 113-123 (2004)
- Zucker, D. B., A. Y. Kniazev, E. F. Bell, D. Martínez-Delgado, E. K. Grebel, H.-W. Rix, C. M. Rockosi, J. A. Holtzman, R. A. M. Walterbos, J. Annis, D. G. York, Z. Ivezic, J. Brinkmann, H. Brewington, M. Harvanek, G. Hennessy, S. J. Kleinman, J. Krzesinski, D. Long, P. R. Newman, A. Nitta, S. A. Snedden: Andromeda IX: A new dwarf spheroidal satellite of M 31. *The Astrophysical Journal* 612, L121-L124 (2004)
- Zucker, D. B., A. Y. Kniazev, E. F. Bell, D. Martínez-Delgado, E. K. Grebel, H.-W. Rix, C. M. Rockosi, J. A. Holtzman, R. A. M. Walterbos, Z. Ivezic, J. Brinkmann, H. Brewington, M. Harvanek, S. J. Kleinman, J. Krzesinski, D. Q. Lamb, D. Long, P. R. Newman, A. Nitta, S. A. Snedden: A new giant stellar structure in the outer halo of M 31. *The Astrophysical Journal* 612, L117-L120 (2004)

Eingeladene Beiträge und Übersichtsartikel

- Brandner, W.: Adaptive optics in star formation. In: *Star formation at high angular resolution*, (Eds.) M. Burton, R. Jayawardhana. *Proceedings of IAU Symp. 221, ASP*, 323-332 (2004)
- Chesneau, O., C. Leinert, F. Przygodda, A. Glazenberg-Kluttig, U. Graser, W. Jaffe, R. Köhler, B. Lopez, S. Morel, G. Perrin, A. Richichi, M. Schöller, L. B. F. M. Waters: First MIDI science observations on VLT. *Baltic Astronomy* 13, 510-517 (2004)
- Henning, T., C. Jäger, H. Mutschke: Laboratory studies of carbonaceous dust analogs. In: *Astrophysics of dust*, (Eds.) A. N. Witt, G. C. Clayton, B. T. Draine. *ASP Conf. Ser. 309, ASP*, 603-628 (2004)
- Hofferbert, R., D. Lemke, A. Böhm, U. Grözinger, T. Henning, A. Huber, O. Krause, S. Mertin, J. Ramos, R.-R. Rohloff, G. Luichtel, K. Weidlich, G. Baudin, W. Posselt, R. Nalbandian, P. Jensen: Prototyping of cryomechanisms for the JWST Near-Infrared Spectrograph (NIRSPEC). In: *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, (Eds.) J. Antebi, D. Lemke. *SPIE 5495, SPIE*, 56-66 (2004)
- Leinert, C.: VLTI – early results. In: *Star formation at high angular resolution*, (Eds.) M. Burton, R. Jayawardhana. *Proceedings of IAU Symp. 221, ASP*, 293-300 (2004)
- Leinert, C.: Scientific observations with MIDI on the VLTI: Present and future. In: *New frontiers in stellar interferometry*, (Ed.) W. A. Traub. *SPIE 5491, SPIE*, 19-27 (2004)
- Lemke, D., R. Hofferbert, U. Grözinger, R.-R. Rohloff, A. Böhm, T. Henning, A. Huber, S. Mertin, J. Ramos, G. S. Wright, P. Hastings, A. Zehnder, S. Salasca, G. Kroes, C. Straubmeier, A. Eckart: Positioning of optical elements in the cryogenically cooled mid infrared instrument MIRI for the James Webb Space Telescope. In: *Astronomical telescopes and instrumentation*, (Eds.) J. Antebi, D. Lemke. *SPIE 5495, SPIE*, 31-38 (2004)
- Röttgering, H., W. J. Jaffe, K. Meisenheimer, H. Sol, C. Leinert, A. Richichi, M. Wittkowski: Observing the Seyfert 2 nucleus of NGC 1068 with the VLT interferometer. In: *New frontiers in stellar interferometry*, (Ed.) W. A. Traub. *SPIE 5491, SPIE*, 9-18 (2004)

Tagungsbeiträge

- Apai, D., I. Pascucci, H. Wang, W. Brandner, T. Henning, C. Grady, D. Potter: Adaptive optics imaging of circumstellar environments. In: *Star Formation at High Angular Resolution*, (Eds.) M. Burton, R. Jayawardhana, T. Bourke. *Proceedings of IAU Symp. 221*, ASP, 307-312 (2004)
- Bagoly, Z., I. Csabai, A. Mészáros, P. Mészáros, I. Horváth, L. G. Balázs, R. Vavrek: Redshifts of the long Gamma-ray bursts. *Baltic Astronomy* 13, 227-230 (2004)
- Bakker, E., A. Quirrenbach, R. Tubbs, D. Segransan, R. Launhardt, L. Venema, R. Dandliker, J. de Jong, S. Frink, D. Gillet, S. Hekker, T. Henning, W. Jaffe, R. Le Poole, P. Mullhaupt, K. Murakawa, F. Pepe, D. Queloz, L. Sasse, J. Setiawan, D. Sosnowska, R. Wuethrich: PRIMA astrometry operations and software. In: *New frontiers in stellar interferometry*, SPIE 5491, SPIE, 1203-1211 (2004)
- Berton, A., R. G. Gratton, M. Feldt, S. Desidera, E. Masciadri, M. Turatto, R. U. Claudi, G. Piotto, C. Pernechele, J. Antichi: Simulations of exoplanets detection obtained with a high-contrast imaging instrument: CHEOPS. In: *Advancements in adaptive optics*, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 672-682 (2004)
- Berton, A., S. Kellner, M. Feldt, E. Masciadri, R. Lenzen, W. Brandner, M. Hartung, R. G. Gratton: Simulations versus observations obtained with simultaneous differential imaging. In: *Advancements in adaptive optics*, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 661-671 (2004)
- Biller, B. A., L. Close, R. Lenzen, W. Brandner, D. W. McCarthy, E. Nielsen, M. Hartung: Suppressing speckle noise for simultaneous differential extrasolar planet imaging (SDI) at the VLT and MMT. In: *Advancements in adaptive optics*, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 389-397 (2004)
- Birkmann, S., K. Eberle, U. Grözinger, D. Lemke, J. Schreiber, L. Barl, R. Katterloher, A. Poglitsch, J. Schubert, H. Richter: Characterization of high- and low-stressed Ge:Ga array cameras for HERSCHEL's PACS instrument. In: *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, (Ed.) J. C. Mather. SPIE 5487, SPIE, 437-447 (2004)
- Bizenberger, P., D. Andersen, H. Baumeister, U. Beckmann, E. Diolaiti, T. M. Herbst, W. Laun, L. Mohr, V. Naranjo, C. Straubmeier: The LINC-NIRVANA cryogenic interferometric camera. In: *UV and Gamma-Ray Space Telescope Systems*, (Eds.) G. Hasinger, M. J. L. Turner. SPIE 5492, SPIE, 1461-1470 (2004)
- Bouy, H., J. Bouvier, W. Brandner: Statistical and physical properties of binaries of low-mass stars and brown dwarfs. In: *SF2A-2004: Semaine de l'Astrophysique Française*, (Eds.) F. Combes, D. Barret, T. Contini, F. Meynadier, L. Pagani. *EdP-Sciences Conference Series EdP-Sciences*, 273 (2004)
- Burkert, A., T. Naab: The formation of spheroidal stellar systems. In: *Coevolution of black holes and galaxies*, (Ed.) L. C. Ho. *Carnegie observatories astrophysics series Cambridge Univ. Pr.*, 422 (2004)
- Chesneau, O., C. Leinert, B. Lopez, G. Perrin, A. Dutrey: Status of the MIDI instrument and first scientific results. In: *SF2A-2004: Semaine de l'Astrophysique Française*, (Eds.) F. Combes, D. Barret, T. Contini, F. Meynadier, L. Pagani. *EdP-Sciences Conference Series EdP-Sciences*, 38 (2004)
- Chini, M., V. Hoffmeister, M. Nielbock, D. Nürnberger, L. Schmidtbreick, J. Steinacker, M. Sterzik: A massive accretion disk in M17. *Astronomische Nachrichten. Issue 2 Supplement*, 325, 9 (2004)
- Claudi, R. U., J. Costa, M. Feldt, R. Gratton, A. Amorim, T. Henning, S. Hippler, R. Neuhauser, C. Pernechele, M. Turatto, H. M. Schmid, R. Walters, H. Zinnecker: CHEOPS: A second generation VLT instrument for the direct detection of exo-planets. In: *Second EDDINGTON Workshop: Stellar structure and habitable planet finding*, (Eds.) F. Favata, S. Aigrain, A. Wilson. *ESA SP- 538*, ESA, 301-304 (2004)
- Costa, J. B., M. Feldt, K. Wagner, P. Bizenberger, S. Hippler, H. Baumeister, M. Stumpf, R. Ragazzoni, S. Esposito, T. Henning: Status report of PYRAMIR: A near-infrared pyramid wavefront sensor for ALFA. In: *Advancements in adaptive optics*, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 1189-1199 (2004)
- Dugue, M., B. Lopez, F. Przygodda, U. Graser, P. Gitton, S. Wolf, P. Mathias, P. Antonelli, J. C. Augereau, N. Berruyer, Y. Bresson, O. Chesneau, A. Dutrey, S. Flament, A. Glazeborg-Kluttig, A. Glindemann, T. Henning, K.-H. Hofmann, S. Lagarde, Y. Hugues, C. Leinert, K. Meisenheimer, J.-L. Menut, R.-R. Rohloff, A. Roussel, E. Thiebaud, G. Weigelt: Recombining light of the VLTI at 10 microns by densifying the images. In: *New frontiers in stellar interferometry*, (Ed.) W. A. Traub. SPIE 5491, SPIE, 1536-1539 (2004)
- Egner, S. E., W. Gaessler, T. M. Herbst, R. Ragazzoni, R. Stuik, D. A. Andersen, C. Arcidiacono, H. Baumeister, U. Beckmann, J. Behrend, T. Bertram, P. Bizenberger, H. Boehnhardt, E. Diolaiti, T. Driebe, A. Eckhardt, J. Farinato, M. Kuerster, W. Laun, S. Ligi, V. Naranjo, E. Nußbaum, H.-W. Rix, R.-R. Rohloff, P. Salinari, R. Soci, C. Straubmeier, E. Vernet-Viard, G. P. Weigelt, R. Weiss, W. Xu: LINC-NIRVANA: the single arm MCAO experiment. In: *Advancements in adaptive optics*, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 924-933 (2004)
- Eisloffel, J., M. Kürster, A. P. Hatzes, E. Guenther: The nature of OGLE transiting planet candidates. In: *Extrasolar planets: Today and tomorrow*, (Eds.) J.-P. Beaulieu, A. Lecavelier des Etangs, C. Terquem. *ASP Conf. Ser. 321*, ASP, 113-114 (2004)
- Eisloffel, J., M. Kürster, A. P. Hatzes, E. Guenther: The nature of OGLE transiting planet candidates. In: *Stellar structure and habitable planet finding*, (Eds.) F. Favata, S. Aigrain, A. Wilson. *ESA SP- 538*, ESA, 81-85 (2004)

- Falterer, S., H.-J. Röser, H. Hippelein, C. Wolf, E. Bell: HIROCS – a galaxy cluster survey at high redshifts. In: *Outskirts of galaxy clusters: Intense life in the suburbs*, (Ed.) A. Diaferio. IAU Symposium and Colloquium Proceedings Series 195, Cambridge Univ. Pr., 233-235 (2004)
- Farinato, J., R. Ragazzoni, C. Arcidiacono, B. Paolo, A. Baruffolo, H. Baumeister, R. Bisson, H. Bönnhardt, A. Brindisi, J. Brynnel, M. Cecconi, J. Coyne, B. Delabre, E. Diolaiti, R. Donaldson, E. Fedrigo, F. Franza, W. Gaessler, A. Ghedina, T. M. Herbst, N. N. Hubin, S. Kellner, J. Kolb, J.-L. Lizon, M. Lombini, E. Marchetti, G. Meneghini, L. Mohr, R. Reiss, R.-R. Rohloff, R. Soci, E. Vernet, R. Weiss, M. Xompero, W. Xu: Layer-oriented on paper, laboratory, and soon on the sky. In: *Emerging optoelectronic applications*, (Eds.) G. E. Jabbour, J. T. Rantala. SPIE 5382, SPIE, 578-587 (2004)
- Feldt, M., J. B. Costa, M. Stumpf, H.-M. Schmid, A. Berton, S. Hippler, R. Stuik, J. Lima: Wavefront sensing through spatial filters: The case for coronagraphic, high-contrast AO systems. In: *Advancements in adaptive optics*, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 1146-1154 (2004)
- Frink, S., S. Hekker, R. Launhardt, J. Setiawan, D. Segransan, A. Quirrenbach, T. Henning, D. Queloz: Preparing the PRIMA astrometric planet search: selecting suitable target and reference stars. In: *New frontiers in stellar interferometry*, (Ed.) W. A. Traub. SPIE 5491, SPIE, 1166-1173 (2004)
- Gaessler, W., R. Ragazzoni, T. M. Herbst, D. R. Andersen, C. Arcidiacono, H. Baumeister, U. Beckmann, J. Behrend, T. Bertram, P. Bizenberger, H. Bönnhardt, F. Briegel, E. Diolaiti, T. M. Driebe, A. Eckhardt, S. E. Egner, J. Farinato, M. Heininger, M. Kürster, W. Laun, S. Ligor, V. Naranjo, E. Nussbaum, H.-W. Rix, R.-R. Rohloff, P. Salinari, R. Soci, C. Storz, C. Straubmeier, E. Vernet-Viard, G. P. Weigelt, R. Weiss, W. Xu: LINC-NIRVANA: how to get a 23-m wavefront nearly flat. In: *Advancements in adaptive optics*, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 527-534 (2004)
- Gallagher, J. S., E. K. Grebel, D. Harbeck: Spheroidal Dwarfs and Early Chemical Evolution of Galaxies. In: *Origin and evolution of the elements*, (Eds.) A. McWilliam, M. Rauch. Carnegie Observatories Astrophysics Series Carnegie Observatories, 23 (2004)
- Ghedina, A., W. Gaessler, M. Cecconi, R. Ragazzoni, A. T. Puglisi, F. De Bonis: Latest developments on the loop control system of AdOpt@TNG. In: *Advancements in adaptive optics*, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 1347-1355 (2004)
- Gisler, D., H. M. Schmid, C. Thalmann, H. P. Povel, J. O. Stenflo, F. Joos, M. Feldt, R. Lenzen, J. Tinbergen, R. Gratton, R. Stuik, D. M. Stam, W. Brandner, S. Hippler, M. Turatto, R. Neuhauser, C. Dominik, A. Hatzes, T. Henning, J. Lima, A. Quirrenbach, L. B. F. M. Waters, G. Wuchterl, H. Zinnecker: CHEOPS/ZIMPOL: A VLT instrument study for the polarimetric search of scattered light from extrasolar planets. In: *UV and Gamma-Ray Space Telescope Systems*, (Eds.) G. Hasinger, M. J. L. Turner. SPIE 5492, SPIE, 463-474 (2004)
- Grady, C. A., B. Woodgate, C. A. O. Torres, T. Henning, D. Apai, J. Rodmann, H. Wang, B. Stecklum, H. Linz, G. M. Williger, A. Brown, E. Wilkinson, G. M. Harper, G. J. Herczeg: The disk, jet, and environment of the nearest Herbig Ae star: HD 104237. In: *The search for other worlds*, AIP Conference Proceedings 713, 47-50 (2004)
- Gratton, R., M. Feldt, H. M. Schmid, W. Brandner, S. Hippler, R. Neuhauser, A. Quirrenbach, S. Desidera, M. Turatto, D. M. Stam: The science case of the CHEOPS planet finder for VLT. In: *UV and Gamma-Ray Space Telescope Systems*, (Eds.) G. Hasinger, M. J. L. Turner. SPIE 5492, SPIE, 1010-1021 (2004)
- Gray, M. E., C. Wolf, K. Meisenheimer, A. Taylor, S. Dye, A. Borch, M. Kleinheinrich: Linking star formation and environment in supercluster galaxies. In: *Outskirts of galaxy clusters: Intense life in the suburbs*, (Ed.) A. Diaferio. IAU Colloquium 195, Cambridge Univ. Pr., 390-393 (2004)
- Grebel, E. K.: The evolutionary history of local group irregular galaxies. In: *Origin and evolution of the elements*, (Eds.) A. McWilliam, M. Rauch. Carnegie Observatories Astrophysics Series Cambridge Univ. Pr., 237 (2004)
- Grebel, E. K., A. Y. Kniazev, D. B. Zucker, E. F. Bell, H. C. Harris: Planetary nebulae in the outer disk and halo of M31. *Bulletin of the American Astronomical Society* 36, 801 (2004)
- Hatzes, A. P., J. Setiawan, L. Pasquini, L. da Silva: Asteroseismology and extrasolar planets of K giants. In: *Stellar structure and habitable planet finding*, (Eds.) F. Favata, S. Aigrain, A. Wilson. ESA SP- 538, ESA, 87-92 (2004)
- Herbst, T. M., R. Ragazzoni, A. Eckart, G. Weigelt: The LINC-NIRVANA interferometric imager for the Large Binocular Telescope. In: *UV and Gamma-Ray Space Telescope Systems*, (Eds.) G. Hasinger, M. J. L. Turner. SPIE 5492, SPIE, 1045-1052 (2004)
- Hippler, S., D. P. Looze, W. Gaessler: Off-the-shelf real-time computers for next-generation adaptive optics. In: *Advancements in adaptive optics*, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 1402-1413 (2004)
- Hofferbert, R., D. Lemke, U. Grözinger, T. Henning, S. Mertin, R.-R. Rohloff, K. Wagner, G. S. Wright, H. Visser, J. Katzer, M. Salvasohn, W. Posselt, G. Fargant, R. Nalbandian: Cryomechanisms for the instruments MIRI and NIRSPEC on the James Webb Space Telescope (JWST). In: *Infrared Spaceborne Remote Sensing XI*, (Ed.) M. Strojnik. 5152, SPIE, 70-82 (2004)
- Kayser, A., E. K. Grebel, M. Odenkirchen, W. Dehnen, H.-W. Rix: Kinematic study of the tidal tails of Palomar 5. *Astronomische Nachrichten. Issue 1 Supplement* 325, 99 (2004)
- Kellner, S., R. Ragazzoni, W. Gaessler, E. Diolaiti, J. Farinato, C. Arcidiacono, R. M. Myers, T. J. Morris, A.

- Ghedina: PIGS on sky – dream or reality? In: Emerging optoelectronic applications, (Eds.) G. E. Jabbour, J. T. Rantala. SPIE 5382, SPIE, 520-525 (2004)
- Kiss, C., U. Klaas, D. Lemke: Cirrus structure and confusion noise as HERSCHEL will (probably) see. In: The dusty and molecular Universe: A prelude to HERSCHEL and ALMA, (Ed.) A. Wilson. ESA Conference Series ESA, 244 (2004)
- Kiss, Z., L. V. Tóth, M. Miller, Y. Yonekura: CO measurements of optically dark clouds in Cepheus. *Baltic Astronomy* 13, 430-433 (2004)
- Klahr, H., P. Bodenheimer: Tornados and hurricanes in planet formation. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica. Conference Series* 22, 87-90 (2004)
- Koch, A., E. K. Grebel, M. Odenkirchen, J. A. R. Caldwell: Correcting spatial gradients. *The Messenger* 115, 37-39 (2004)
- Köhler, R.: Using speckle interferometry to resolve binary stars. In: Spectroscopically and spatially resolving the components of the close binary stars, (Eds.) R. W. Hidlitch, H. Hensberge, K. Pavlovski. ASP Conf. Ser. 318, ASP, 25-33 (2004)
- Köhler, R.: What causes the low binary frequency in the Orion Nebula Cluster? *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica. Serie de conferencias* 21, 104-108 (2004)
- Köhler, R., S. Hippler, M. Feldt, R. Gratton, D. Gisler, R. Stuik, J. Lima: Optimizing wavefront sensing for extreme AO. In: Advancements in adaptive optics, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 586-592 (2004)
- Könyves, V., C. Kiss, A. Moor: Infrared loops and the large scale structure of the diffuse interstellar matter in the Milky Way. In: Proceedings of the British-Hungarian N+N Workshop for Young Researchers On Computer processing and use of satellite data in astronomy and astrophysics, (Eds.) E. Forgács-Dajka, K. Petrovay, R. Erdélyi. *PADEU* 14, 101-111 (2004)
- Könyves, V., A. Moor, C. Kiss, P. Abraham: Young stellar objects in LDN1188. In: Mini-Symposium at JENAM, 13, *Baltic Astronomy*, 470-473 (2004)
- Kovács, Z., U. Mall, P. Bizenberger, H. Baumeister, H.-J. Röser: Characterization, testing, and operation of Omega2000 wide-field infrared camera. In: Optical and infrared detectors for astronomy, (Eds.) J. D. Garnett, J. W. Beletic. SPIE 5499, SPIE, 432-441 (2004)
- Krause, O., R. Vavrek, S. Birkmann, U. Klaas, M. Stickel, L. V. Tóth, D. Lemke: Early stages of massive star formation revealed by ISO. *Baltic Astronomy* 13, 407-410 (2004)
- Küker, M., T. Henning, G. Rüdiger: Magnetic Star-Disk Interaction in classical T Tauri stars. *Astrophysics and Space Science* 292, 599-607 (2004)
- Kun, M., D. Apai, I. Pascucci, S. Nikolic, M. Eredics: Initial conditions of low, intermediate and high mass star formation. *Baltic Astronomy* 13, 434-438 (2004)
- Kürster, M., M. Endl: Searching for terrestrial planets in the habitable zone of M dwarfs. In: Extrasolar planets: Today and tomorrow, (Eds.) J.-P. Beaulieu, A. Lecavelier des Etangs, C. Terquem. ASP Conf. Ser. 321, ASP, 84-92 (2004)
- Lamm, M. H., C. A. L. Bailer-Jones, R. Mundt, W. Herbst, A. Scholz: A rotational period study of a large sample of pre-main sequences stars in NGC 2264. In: Stellar rotation, (Eds.) A. Maeder, P. Eenens. Proceedings of IAU Symp. 215, ASP, 125-126 (2004)
- Laun, W., H. Baumeister, P. Bizenberger: Cooling of ground-based telescope instrumentation: the LINC-NIRVANA cryostat. In: UV and Gamma-Ray Space Telescope Systems, (Eds.) G. Hasinger, M. J. L. Turner. SPIE 5492, SPIE, 1725-1734 (2004)
- Launhardt, R., A. Sargent, H. Zinnecker: Observations of binary protostellar systems. In: Star formation at high angular resolution, (Eds.) M. Burton, R. Jayawardhana. Proceedings of IAU Symp. 221, ASP, 213-222 (2004)
- Lee, H., E. K. Grebel, P. W. Hodge: Oxygen abundances of nearby southern dwarf galaxies. In: Origin and evolution of the elements, (Eds.) A. McWilliam, M. Rauch. Carnegie Observatories Astrophysics Series Carnegie Observatories, 34 (2004)
- Lenzen, R., L. Close, W. Brandner, B. Biller, M. Hartung: A novel simultaneous differential imager for the direct imaging of giant planets. In: UV and Gamma-Ray Space Telescope Systems, (Eds.) G. Hasinger, M. J. L. Turner. SPIE 5492, SPIE, 970-977 (2004)
- Ligori, S., B. Grimm, S. Hippler: Performance of PYRAMIR detector system. In: Advancements in adaptive optics, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 1278-1285 (2004)
- Ligori, S., R. Lenzen, H. Mandel, B. Grimm, U. Mall: The MPIA detector system for the LBT instruments LUCIFER and LINC-NIRVANA. In: Z-Spec: a broadband millimeter-wave grating spectrometer: design, construction, and first cryogenic measurements, (Eds.) C. Bradford, M. Ade, P. A. R., J. E. Aguirre, J. J. Bock, M. Dragovan, L. Duband, L. Earle, J. Glenn, H. Matsuhara, B. J. Naylor, H. T. Nguyen, M. Yun, J. Zmuidzinas. SPIE 5499, SPIE, 108-118 (2004)
- Looze, D. P., S. Hippler, M. Feldt: Modal selection using genetic optimization. In: Advancements in adaptive optics, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 1450-1459 (2004)
- Lopez, B., F. Przygodda, S. Wolf, M. Dugue, U. Graser, P. Gitton, P. Mathias, P. Antonelli, J. C. Augereau, N. Berruyer, Y. Bresson, O. Chesneau, A. Dutrey, S. Flament, A. Glazeborg, A. Glindemann, T. Henning, K.-H. Hofmann, Y. Hugues, S. Lagarde, C. Leinert, K. Meisenheimer, J.-L. Menut, R.-R. Rohloff, A. Roussel, E. Thiebaut, G. P. Weigelt APRES-MIDI, APerture synthesis in the Mid-infrared with the VLTI. In: New frontiers in stellar interferometry, (Ed.) W. A. Traub. SPIE 5491, SPIE, 433-438 (2004)
- Mandel, H., I. Appenzeller, W. Seifert, H. Baumeister, P. Bizenberger, R.-J. Dettmar, H. Gemperlein, B. Grimm, T. M. Herbst, R. Hofmann, M. Jutte, W. Laun, M. Lehmitz, S. Ligori, R. Lenzen, K. Polsterer, R.-R. Rohloff, A.

- Schuetze, A. Seltmann, P. Weiser, H. Weisz, W. Xu: LUCIFER status report, summer 2004. In: UV and Gamma-Ray Space Telescope Systems, (Eds.) G. Hasinger, M. J. L. Turner. SPIE 5492, SPIE, 1208-1217 (2004)
- Masciadri, E., S. E. Egner: First complete seasonal variation study of the 3D optical turbulence above San Pedro Martir Observatory. In: Advancements in adaptive optics, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 818-829 (2004)
- Masciadri, E., M. Feldt, S. Hippler: Scintillation effects on a high-contrast imaging instrument for direct detection of exoplanets. In: Advancements in adaptive optics, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 483-494 (2004)
- Masciadri, E., R. Mundt, C. Alvarez, T. Henning, C. Bailer-Jones, M. Lamm, D. Barrado-Navascues, Y. Harayama: A search for hot massive planets around nearby young stars with NACO. In: Extrasolar planets: Today and tomorrow, (Eds.) J.-P. Beaulieu, A. Lecavelier des Etangs, C. Terquem. ASP Conf. Ser. 321, ASP, 123 (2004)
- Menut, J.-L., O. Chesneau, B. Lopez, N. Berruyer, U. Graser, G. Niccolini, A. Dutrey, G. Perrin: Preliminary result of the analysis of T Sagittarii data and modeling. In: New frontiers in stellar interferometry, (Ed.) W. A. Traub. SPIE 5491, SPIE, 1733-1735 (2004)
- Morel, S., P. Ballester, B. Bauvir, P. Biereichel, J.-G. Cuby, E. Galliano, N. Haddad, N. Housen, C. Hummel, A. Kaufer, P. Kervella, I. Percheron, F. Puech, F. Rantakyro, A. Richichi, C. Sabet, M. Schoeller, J. Spyromilio, M. Vannier, A. Wallander, M. Wittkowski, C. Leinert, U. Graser, U. Neumann, W. Jaffe, J. de Jong: Preparing MIDI science operation at VLTI. In: New Frontiers in Stellar Interferometry, (Ed.) W. A. Traub. SPIE 5491, SPIE, 1666-1677 (2004)
- Newberg, H. J., B. Yanny, E. K. Grebel, D. Martínez-Delgado, M. Odenkirchen, H.-W. Rix: Galactic halo substructure from A-F stars in the SDSS. In: Milky Way Surveys: The structure and evolution of our galaxy, (Eds.) D. Clemens, R. Shah, T. Brainerd. ASP Conf. Ser. 317, ASP, 264-267 (2004)
- Omont, A., T. P. Team, W. Zheng, H. C. Ford, J. W. Kruk, Z. I. Tsvetanov, A. S. Szalay, P. K. Shu, M. A. Greenhouse, G. Hartig, M. Postman, H. S. Stockman, G. M. Voit, R. Lenzen, H.-W. Rix, S. Kent, C. Stoughton, Y. Mellier: PRIME: A deep near-infrared survey project. In: Toward an International Virtual Observatory, (Eds.) P. J. Quinn, K. M. Gorski. ESO Astrophysics Symposia Springer, 298 (2004)
- Oya, S., N. Takato, H. Takami, Y. Hayano, M. Iye, H. Terada, K. Murakawa, Y. Minowa, M. Hattori, M. Watanabe, Y. Kamata, T. Kanzawa, T. Kane, W. Gaessler: Subaru adaptive optics system after two years of open use. In: Advancements in adaptive optics, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 409-420 (2004)
- Peng, C. Y., C. D. Impey, E. E. Falco, C. R. Keeton, C. S. Kochanek, J. Lehar, B. McLeod, J. Munoz, H.-W. Rix, D. Rusin: Lensed quasar host galaxies. In: Coevolution of black holes and galaxies, (Ed.) L. C. Ho. Carnegie Observatories Astrophysics Series Carnegie Observatories, 49 (2004)
- Peng, C. Y., C. D. Impey, H.-W. Rix, C. S. Kochanek, E. E. Falco, J. Lehar, B. A. McLeod, C. R. Keeton: Possible supernova associated with Q0957+561. International Astronomical Union Circular 8298, 1 (2004)
- Poglitsch, A., R. Katterloher, R. Hönle, H. Richter, J. Schubert, Y. Creten, P. Merken, U. Grözinger, D. Lemke, J. W. Beeman, E. E. Haller, N. M. Haegel, L. Reichertz: The photoconductor array development for PACS and FIFI LS. In: Astronomical telescopes and instrumentation, (Eds.) J. Zmuidzinas, W. S. Holland, S. Withington. SPIE 5498, SPIE, (2004)
- Poglitsch, A., C. Waelkens, O. H. Bauer, J. Cepa, C. Van Hoof, R. Katterloher, F. Kerschbaum, D. Lemke, E. Renoote, L. Rodriguez, P. Royer, P. Saraceno: The photodetector array camera and spectrometer (PACS) for HERSCHEL. In: Astronomical Telescopes and Instrumentation, (Ed.) J. C. Mather. SPIE 5487, SPIE, 425-436 (2004)
- Posselt, B., R. Klein, K. Schreyer, T. Henning: Dense cloud cores in massive star-forming regions. Baltic Astronomy 13, 411-414 (2004)
- Pott, J.-U., A. Glindemann, A. Eckart, M. Schoeller, C. Leinert, T. Viehmann, M. Robberto: A feasibility study of future observations with MIDI and other VLTI science instruments: the example of the Galactic Center. In: New frontiers in stellar interferometry, (Ed.) W. A. Traub. SPIE 5491, SPIE, 126-135 (2004)
- Quirrenbach, A., T. Henning, D. Queloz, S. Albrecht, E. J. Bakker, H. Baumeister, P. Bizenberger, H. Bleuler, R. Dandliker, J. de Jong, M. Fleury, S. Frink, D. Gillet, W. Jaffe, S. H. Hanenburg, S. Hekker, R. Launhardt, R. Le Poole, C. Maire, R. Mathar, P. Mullhaupt, K. Murakawa, F. Pepe, J. Pragt, L. Sache, O. Scherler, D. Segransan, J. Setiawan, D. Sosnowska, R. Tubbs, L. Venema, K. Wagner, L. Weber, R. Wuethrich: The PRIMA astrometric planet search project. In: New frontiers in stellar interferometry, (Eds.) W. A. Traub, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5491, SPIE, 424-432 (2004)
- Reif, K., H. Poschmann, K.-H. Marien, P. Mueller: Performance tests of a DIVA-CCD: Before and after proton irradiation. In: Focal plane arrays for space telescopes, (Eds.) T. J. Grycewicz, C. R. McCreight. SPIE 5167, SPIE, 320-331 (2004)
- Rengel, M., D. Froebrich, S. Wolf, J. Eisloffel: Modeling the continuum emission from class 0 protostellar sources. Baltic Astronomy 13, 449-453 (2004)
- Rohloff, R.-R., H. Baumeister, M. Ebert, N. Münch, V. Naranjo: Cryogenic actuators in ground-based astronomical instrumentation. In: Astronomical Telescopes and Instrumentation, (Eds.) J. Antebi, D. Lemke. SPIE 5495, SPIE, 636-643 (2004)
- Röser, H.-J., H. Hippelein, C. Wolf: The Heidelberg InfraRed / Optical Cluster Survey (HIROCS). In: Clusters of galaxies: Probes of cosmological structure and galaxy evolution, (Eds.) J. S. Mulchaey, A. Dressler, A. Oemler, Jr.

- Carnegie Observatories Astrophysics Series 3, Carnegie Observatories, (2004)
- Seifert, W., W. Laun, M. Lehmitz, H. Mandel, A. Schuetze, A. Seltmann: LUCIFER: Status and results of the hardware testing. In: *UV and Gamma-Ray Space Telescope Systems*, (Eds.) G. Hasinger, M. J. L. Turner. SPIE 5492, SPIE, 1343-1350 (2004)
- Semenov, D., Y. Pavlyuchenkov, T. Henning, E. Herbst, E. van Dishoeck: On the feasibility of chemical modeling of a protoplanetary disk. *Baltic Astronomy* 13, 454-458 (2004)
- Setiawan, J., L. da Silva, L. Pasquini, A. P. Hatzes, O. von der Luhe, L. Girardi, E. Guenther: Binaries from FEROS radial velocity survey. In: *In spectroscopically and spatially resolving the components of the close binary stars*, (Eds.) R. W. Hilditch, H. Hensberge, K. Pavlovski. ASP Conf. Ser. 318, ASP, 283-285 (2004)
- Shields, J. C., H.-W. Rix, A. J. Barth, A. V. Filippenko, L. C. Ho, D. H. McIntosh, G. Rudnick, W. L. W. Sargent, M. Sarzi: Black holes as traced by weak active nuclei. In: *Coevolution of black holes and galaxies*, (Ed.) L. C. Ho. Carnegie Observatories Astrophysics Series Carnegie Observatories, 58 (2004)
- Soci, R., R. Ragazzoni, T. M. Herbst, J. Farinato, W. Gaessler, H. Baumeister, R.-R. Rohloff, E. Diolaiti, W. Xu, D. R. Andersen, S. E. Egner, C. Arcidiacono, M. Lombini, M. Ebert, A. Boehm, N. Muench, M. Xompero: LINC-NIRVANA: mechanical challenges of the MCAO wavefront sensor. In: *Advancements in adaptive optics*, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 1286-1295 (2004)
- Stickel, M.: Dust in the Intergalactic Medium of Galaxy Clusters. In: *Recycling intergalactic and interstellar matter*, (Eds.) P.-A. Duc, J. Braine, E. Brinks. *Proceedings of IAU Symp.* 217, ASP, 108-113 (2004)
- Stuik, R., S. Hippler, M. Feldt, J. Aceituno, S. E. Egner: Characterization of deformable mirrors for high-order adaptive optics systems. In: *Advancements in adaptive optics*, (Eds.) D. Bonaccini, B. L. Ellerbroek, R. Ragazzoni. SPIE 5490, SPIE, 1572-1578 (2004)
- Tóth, L. V., O. Krause, C.-H. Kim, Y.-S. Park, S. Hotzel, C. del Burgo, D. Lemke: A faint ISO globule ISOSS J 20380+6352. *Baltic Astronomy* 13, 439-442 (2004)
- Tóth, L. V., R. Vavrek, D. Lemke: Star formation in the Taurus Molecular Ring. *Baltic Astronomy* 13, 443-448 (2004)
- Vavrek, R., L. G. Balázs, A. Mészáros, Z. Bagoly, I. Horváth: Sky distribution of Gamma-ray bursts: AN observational test of the Friedmannian Universe models. *Baltic Astronomy* 13, 231-234 (2004)
- Walcher, C. J., N. Häring, T. Böker, H.-W. Rix, R. P. van der Marel, J. Gerssen, L. C. Ho, J. C. Shields: Nuclear star clusters in bulgeless galaxies. In: *Coevolution of black holes and galaxies*, (Ed.) L. C. Ho. Carnegie Observatories Astrophysics Series Carnegie Observatories, 64 (2004)
- Wiebe, D., D. Semenov, T. Henning: Ionization structure of protoplanetary disks from the chemical perspective. *Baltic Astronomy* 13, 459-463 (2004)
- Wolf, S., G. D'Angelo: ALMA: Searching for giant planets in circumstellar disks. In: *The dusty and molecular Universe: A prelude to HERSCHEL and ALMA*, (Ed.) A. Wilson. ESA Conference Series ESA, 297 (2004)
- Wolf, S., H. Klahr: Observing early stages of planet formation with ALMA: Large-scale Vortices in Protoplanetary Disks. In: *The dusty and molecular Universe: A prelude to HERSCHEL and ALMA*, (Ed.) A. Wilson. ESA Conference Series ESA, 307 (2004)
- Wolf, S., R. Launhardt, T. Henning: Evolution of magnetic fields in Bok globules? *Astrophysics and Space Science* 292, 239-246 (2004)
- Wright, G. S., G. Rieke, L. Colina, E. Van Dishoeck, G. Goodson, T. Greene, P. Lagage, A. Karnik, S. Lambros, D. Lemke, M. Meixner, H. Norgaard, G. Oloffson, T. Ray, M. Ressler, C. Waelkens, D. Wright, A. Zehnder: The JWST MIRI instrument concept. In: *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, (Ed.) J. C. Mather. SPIE 5487, SPIE, 653-663 (2004)
- Zucker, D. B., T. K. Wyder: Metallicities of RGB stars in local group dwarf irregular galaxies. In: *Metallicities of RGB stars in local group dwarf irregular galaxies*, (Eds.) A. McWilliam, M. Rauch. Carnegie Observatories Astrophysics Series Carnegie Observatories, 62 (2004)

Tagungsbericht und Bücher

- J. Antebi, D. Lemke (Eds.): *Astronomical structures and mechanisms technology*, SPIE 5495. SPIE, 688 pp (2004)

Populärwissenschaftliche Beiträge

- Bailer-Jones, C. A. L., U. Bastian: Die neuen Spektraltypen L und T. *Sterne und Weltraum* 5/43 (2004), 20
- Bonnet, H., R. Abuter, A. Baker, W. Bornemann, A. Brown, R. Castillo, R. Conzelmann, R. Damster, R. Davies, B. De-labre, R. Donaldson, C. Dumas, F. Eisenhauer, E. Elswijk, E. Fedrigo, G. Finger, H. Gemperlein, R. Genzel, A. Gilbert, G. Gillet, A. Goldbrunner, M. Horrobin, R. Ter Horst, S. Huber, N. Hubin, C. Iserlohe, A. Kaufer, M. Kissler-Patig, J. Kragt, G. Kroes, M. Lehnert, W. Lieb, J. Liske, J.-L. Lizon, D. Lutz, A. Modigliani, G. Monnet, N. Nesvadba, J. Patig, J. Pragt, J. Reunanen, C. Röhrle, S. Rossi, R. Schmutzer, T. Schoenmaker, J. Schreiber, S. Ströbele, T. Szeifert, L. Tacconi, M. Tecza, N. Thatte, S. Tordo, P. Van der Werf, H. Weisz: First light of SINFONI at the VLT. *The ESO Messenger* 117, 17–24 (2004)
- Dannerbauer, H.: Das „Astrophysical Virtual Observatory“-Projekt. *Sterne und Weltraum* 11/43 (2004), 19–20
- Hippler, S., M. Kasper: Dem Seeing ein Schnippchen schlagen. *Adaptive Optik in der Astronomie Teil I. Sterne und Weltraum* 10/43 (2004), 32–42
- Leinert, C., U. Graser: Interferometrie und Großteleskopen. Das Instrument MIDI erschließt den beobachtenden Astronomen ein neues Forschungsfeld. *Sterne und Weltraum* 11/43 (2004), 32–39
- Lemke, D.: ISO – von der Idee zum Instrument. *Sterne und Weltraum Special* 1/2004, 52–73
- Schreiber, J.: Andromedagalaxie. *Sterne und Weltraum* 6/43 (2004), 16–19

Habilitationen

- Stickel, M.: The ISOPHOT 170 mm Far-Infrared Serendipity Sky Survey. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2004

Doktorarbeiten

- Apai, D.: Exploring the environment of young stars: Disks, companions and clusters. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2004
- Bertschick, M.: The kinematical parameters of minor mergers and their observational traces. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2004
- Borch, A.: Evolution of the stellar mass density of galaxies since redshift 1.0. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2004
- Hempel, A.: Classification and abundance of extremely red galaxies with $R-J > 5$. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2004
- Jesseit, R.: The orbital structure of galaxies and dark matter halos in N-body simulations. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2004
- Pascucci, I.: Massive star formation at high spatial resolution. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2004
- Przygodda, F.: Spektroskopische und interferometrische Untersuchungen an T Tauri-Sternen im mittleren Infrarotbereich. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2004
- Puga, E.: Early stages of massive star formation at high spatial resolution. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2004
- Sukhorukov, O.: Spectroscopy of polycyclic aromatic hydrocarbons for the identification of the diffuse interstellar bands. Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2004

Diplomarbeiten

- D'Souza, R.: Mass estimates from stellar proper motions. Ruprecht-Karls Universität Heidelberg, 2004
- Mertin, S.: Untersuchungen an Komponenten für Filter- und Gitterräder gekühlter Infrarot-Instrumente des James-Webb-Space-Telescopes. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2004
- Stumpf, M.: Laboratory setup for an infrared pyramid wavefront sensor. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2004

Publikationen von Gastbeobachtern des Calar Alto

- Abad, C., J. A. Docobo, V. Lanchares, J. F. Lahulla, P. Abel-leira, J. Blanco, C. Alvarez: Reduction of CCD observations of visual binaries using the „Tepui” function as PSF. *Astronomy and Astrophysics* 416, 811-814 (2004)
- Abia, C., L. Mashonkina: Magnesium abundances in mildly metal-poor stars from different indicators. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 350, 1127-1140 (2004)
- Alcalá, J. M., S. Wachter, E. Covino, M. F. Sterzik, R. H. Durisen, M. J. Freyberg, D. W. Hoard, K. Cooksey: Multi-wavelength observations of the star forming region in L1616. *Astronomy and Astrophysics* 416, 677-697 (2004)
- Beckmann, V., P. Favre, F. Tavecchio, T. Bussien, J. Fliri, A. Wolter: The Gamma-Ray Bright BL Lacertae Object RX J1211+2242. *The Astrophysical Journal* 608, 692-697 (2004)
- Beuther, H., P. Schilke, F. Gueth: Massive molecular outflows at high spatial resolution. *The Astrophysical Journal* 608, 330-340 (2004)
- Capak, P., L. L. Cowie, E. M. Hu, A. J. Barger, M. Dickinson, E. Fernandez, M. Giavalisco, Y. Komiyama, C. Kretchmer, C. McNally, S. Miyazaki, S. Okamura, D. Stern: A deep wide-field, optical, and near-infrared catalog of a large area around the HUBBLE Deep Field North. *The Astronomical Journal* 127, 180-198 (2004)
- Carretero, C., A. Vazdekis, J. E. Beckman, P. Sánchez-Blázquez, J. Gorgas: On the environmental dependence of the cluster galaxy assembly timescale. *The Astrophysical Journal* 609, L45-L48 (2004)
- Castro Cerón, J. M., J. Gorosabel, A. J. Castro-Tirado, V. V. Sokolov, V. L. Afanasiev, T. A. Fatkhullin, S. N. Dodonov, V. N. Komarova, A. M. Cherepashchuk, K. A. Postnov, U. Lisenfeld, J. Greiner, S. Klose, J. Hjorth, J. P. U. Fynbo, H. Pedersen, E. Rol, J. Fliri, M. Feldt, G. Feulner, M. I. Andersen, B. L. Jensen, M. D. Pérez Ramírez, F. J. Vrba, A. A. Henden, G. Israelian, N. R. Tanvir: On the constraining observations of the dark GRB 001109 and the properties of a $z = 0.398$ radio selected starburst galaxy contained in its error box. *Astronomy and Astrophysics* 424, 833-839 (2004)
- Cenarro, A. J., P. Sánchez-Blázquez, N. Cardiel, J. Gorgas: Early-type galaxies in the Coma Cluster: A new piece in the calcium puzzle. *The Astrophysical Journal* 614, L101-L104 (2004)
- Christensen, L., S. F. Sánchez, K. Jahnke, T. Becker, A. Kelz, L. Wisotzki, M. M. Roth: Integral field observations of damped Lyman- α galaxies. *Astronomische Nachrichten* 325, 124-127 (2004)
- Christensen, L., S. F. Sánchez, K. Jahnke, T. Becker, L. Wisotzki, A. Kelz, L. C. Popovic, M. M. Roth: Integral field spectroscopy of extended Ly α emission from the DLA galaxy in Q2233+131. *Astronomy and Astrophysics* 417, 487-498 (2004)
- Comerón, F., J. Torra, C. Chiappini, F. Figueras, V. D. Ivanov, S. J. Ribas: A search for late-type supergiants in the inner regions of the Milky Way. *Astronomy and Astrophysics* 425, 489-508 (2004)
- Cortese, L., G. Gavazzi, A. Boselli, J. Iglesias-Paramo: An extragalactic HII region in the Virgo cluster. *Astronomy and Astrophysics* 416, 119-123 (2004)
- Dall’Ora, M., J. Storm, G. Bono, V. Ripepi, M. Monelli, V. Testa, G. Andreuzzi, R. Buonanno, F. Caputo, V. Castellani, C. E. Corsi, G. Marconi, M. Marconi, L. Pulone, P. B. Stetson: The distance to the large Magellanic Cloud cluster Reticulum from the K-band period-luminosity-metallicity relation of RR Lyrae stars. *The Astrophysical Journal* 610, 269-274 (2004)
- De Ridder, J., J. H. Telting, L. A. Balona, G. Handler, M. Briquet, J. Daszynska-Daszkiewicz, K. Lefever, A. J. Korn, U. Heiter, C. Aerts: Asteroseismology of the δ Cephei star ν Eridani – III. Extended frequency analysis and mode identification. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 351, 324-332 (2004)
- del Olmo, A., A. Martinez, S. Pedraz, M. Alises, O. Trondal, M. Schwartz: Supernova 2004gc in Arp 327. *International Astronomical Union Circular* 8442, 1 (2004)
- Dietrich, M., F. Hamann: Implications of quasar black hole masses at high redshifts. *The Astrophysical Journal* 611, 761-769 (2004)
- Docobo, J. A., M. Andrade, J. F. Ling, C. Prieto, V. S. Tamazian, Y. Y. Balega, J. Blanco, A. F. Maximov, J. F. Lahulla, C. Alvarez: Binary star speckle interferometry: Measurements and orbits. *The Astronomical Journal* 127, 1181-1186 (2004)
- Drory, N., R. Bender, G. Feulner, U. Hopp, C. Maraston, J. Snigula, G. J. Hill: The Munich Near-Infrared Cluster Survey (MUNICS). VI. The stellar masses of K-band-selected field galaxies to $z \sim 1.2$. *The Astrophysical Journal* 608, 742-751 (2004)
- Drummond, J., J. Telle, C. Denman, P. Hillman, J. Spinhirne, J. Christou: Photometry of a sodium laser guide star from the starfire Optical Range. II. Compensating the pump beam. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 116, 952-964 (2004)
- Elias-Rosa, N., G. Pignata, S. Benetti, G. Blanc, A. Della Valle, A. Pastorello, G. Altavilla, H. Navasardyan, M. Turatto, L. Zampieri, E. Cappellaro, F. Patat: Supernova 2004G in NGC 5668. *International Astronomical Union Circular* 8273, 2 (2004)
- Fernández, M., B. Stelzer, A. Henden, K. Grankin, J. F. Gameiro, V. M. Costa, E. Guenther, P. J. Amado, E.

- Rodriguez: The weak-line T Tauri star V410 Tau. II. A flaring star. *Astronomy and Astrophysics* 427, 263-278 (2004)
- Fors, O., A. Richichi, J. Núñez, A. Prades: Infrared and visual lunar occultations measurements of stellar diameters and new binary stars detections at the Calar Alto 1.5 m telescope. *Astronomy and Astrophysics* 419, 285-290 (2004)
- Fritz, A., B. L. Ziegler, R. G. Bower, I. Smail, R. L. Davies: Early-type Galaxies in the Cluster Abell 2390 at $z = 0.23$. In: *Clusters of galaxies: Probes of cosmological structure and galaxy evolution*, (Eds.) J. S. Mulchaey, A. Dressler, A. Oemler. *Carnegie Observatories Astrophysics Series* Carnegie Observatories, 17 (2004)
- Fuhrmann, K.: Nearby stars of the Galactic disk and halo. III. *Astronomische Nachrichten* 325, 3-80 (2004)
- Gandorfer, A. M., S. K. Solanki, M. Schüssler, W. Curdt, B. W. Lites, V. Martínez Pillet, W. Schmidt, A. M. Title: SUNRISE: high-resolution UV/VIS observations of the Sun from the stratosphere. In: *Ground-based telescopes*, (Ed.) J. M. Oschmann. *SPIE* 5489, *SPIE*, 732-741 (2004)
- Gänsicke, B. T., S. Araujo-Betancor, H.-J. Hagen, E. T. Harlaftis, S. Kitsionas, S. Dreizler, D. Engels: HS 2237+8154: On the onset of mass transfer or entering the period gap? *Astronomy and Astrophysics* 418, 265-270 (2004)
- Gehren, T., Y. C. Liang, J. R. Shi, H. W. Zhang, G. Zhao: Abundances of Na, Mg and Al in nearby metal-poor stars. *Astronomy and Astrophysics* 413, 1045-1063 (2004)
- Gerken, B., B. Ziegler, M. Balogh, D. Gilbank, A. Fritz, K. Jäger: Star formation activity of intermediate redshift cluster galaxies out to the infall regions. *Astronomy and Astrophysics* 421, 59-70 (2004)
- Gerssen, J., R. P. van der Marel, D. Axon, J. C. Mihos, L. Hernquist, J. E. Barnes: HUBBLE Space Telescope Observations of NGC 6240: A case study of an ultra-luminous infrared galaxy with obscured activity. *The Astronomical Journal* 127, 75-89 (2004)
- Gilbank, D. G., R. G. Bower, F. J. Castander, B. L. Ziegler: Exploring the selection of galaxy clusters and groups: an optical survey for X-ray dark clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 348, 551-580 (2004)
- Gonzalez, J. J., P. Birtwhistle, R. Behrend, C. Vuissoz: Comet C/2004 Q2 (Machholz). *International Astronomical Union Circular* 8395, 1 (2004)
- Grupp, F.: MAFAGS-OS: New opacity sampling model atmospheres for A, F and G stars. II. Temperature determination and three „standard” stars. *Astronomy and Astrophysics* 426, 309-322 (2004)
- Gutiérrez, C. M., M. Azzaro: The properties of satellite galaxies in external systems. II. Photometry and colors. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 155, 395-400 (2004)
- Haefner, R., A. Fiedler, K. Butler, H. Barwig: Refined system parameters for the pre-cataclysmic binary NN Serpentis. *Astronomy and Astrophysics* 428, 181-190 (2004)
- Hardcastle, M. J., D. E. Harris, D. M. Worrall, M. Birkinshaw: The origins of X-ray emission from the hot spots of FR II radio sources. *The Astrophysical Journal* 612, 729-748 (2004)
- Heber, U., H. Drechsel, R. Østensen, C. Karl, R. Napiwotzki, M. Altmann, O. Cordes, J.-E. Solheim, B. Voss, D. Koester, S. Folkes: HS 2333+3927: A new sdB+dM binary with a large reflection effect. *Astronomy and Astrophysics* 420, 251-264 (2004)
- Huélamo, N., M. Fernández, R. Neuhauser, S. J. Wolk: Rotation periods of Post-T Tauri stars in Lindroos systems. *Astronomy and Astrophysics* 428, 953-967 (2004)
- Jahnke, K., L. Wisotzki, S. F. Sánchez, L. Christensen, T. Becker, A. Kelz, M. M. Roth: Integral field spectroscopy of QSO host galaxies. *Astronomische Nachrichten* 325, 128-131 (2004)
- Kelz, A., M. Verheijen, M. M. Roth, U. Laux, S.-M. Bauer: Development of the wide-field IFU PPak. In: *UV and Gamma-Ray Space Telescope Systems*, (Eds.) G. Hasinger, M. J. L. Turner. *SPIE* 5492, *SPIE*, 719-730 (2004)
- Klose, S., E. Palazzi, N. Masetti, B. Stecklum, J. Greiner, D. H. Hartmann, H. M. Schmid: Prospects for multiwavelength polarization observations of GRB afterglows and the case GRB 030329. *Astronomy and Astrophysics* 420, 899-903 (2004)
- Lanz, T., T. M. Brown, A. V. Sweigart, I. Hubeny, W. B. Landsman: Flash mixing on the white dwarf cooling curve: Far ultraviolet spectroscopic explorer observations of three He-rich sdB stars. *The Astrophysical Journal* 602, 342-355 (2004)
- Le Floc'h, E., P. G. Pérez-González, G. H. Rieke, C. Papovich, J.-S. Huang, P. Barmby, H. Dole, E. Egami, A. Alonso-Herrero, G. Wilson, S. Miyazaki, J. R. Rigby, L. Bei, M. Blaylock, C. W. Engelbracht, G. G. Fazio, D. T. Frayer, K. D. Gordon, D. C. Hines, K. A. Misselt, J. E. Morrison, J. Muzerolle, M. J. Rieke, D. Rigopoulou, K. Y. L. Su, S. P. Willner, E. T. Young: Identification of Luminous Infrared Galaxies at $1 \leq z \leq 2.5$. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 154, 170-173 (2004)
- Lisenfeld, U., J. Braine, P.-A. Duc, E. Brinks, V. Charmandaris, S. Leon: Molecular and ionized gas in the tidal tail in Stephan's Quintet. *Astronomy and Astrophysics* 426, 471-479 (2004)
- López-Sánchez, Á. R., C. Esteban, M. Rodríguez: The tidally disturbed luminous compact blue galaxy Mkn 1087 and its surroundings. *Astronomy and Astrophysics* 428, 425-444 (2004)
- Lütticke, R., M. Pohlen, R.-J. Dettmar: Box- and peanut-shaped bulges. III. A new class of bulges: Thick Boxy Bulges. *Astronomy and Astrophysics* 417, 527-539 (2004)
- Márquez, I., F. Durret, J. Masegosa, M. Moles, J. Varela, R. M. González Delgado, J. Maza, E. Pérez, M. Roth: Long slit spectroscopy of a sample of isolated spirals with and without an AGN. *Astronomy and Astrophysics* 416, 475-498 (2004)

- Martí, J., P. Luque-Escamilla, J. L. Garrido, J. M. Paredes, R. Zamanov: Optical CCD photometry of the microquasar LS 5039. *Astronomy and Astrophysics* 418, 271-274 (2004)
- Merín, B., B. Montesinos, C. Eiroa, E. Solano, A. Mora, P. D'Alessio, N. Calvet, R. D. Oudmaijer, D. de Winter, J. K. Davies, A. W. Harris, A. Cameron, H. J. Deeg, R. Ferlet, F. Garzón, C. A. Grady, K. Horne, L. F. Miranda, J. Palacios, A. Penny, A. Quirrenbach, H. Rauer, J. Schneider, P. R. Wesselius: Study of the properties and spectral energy distributions of the Herbig AeBe stars HD 34282 and HD 141569. *Astronomy and Astrophysics* 419, 301-318 (2004)
- Möllenhoff, C.: Disk-bulge decompositions of spiral galaxies in UBVR. *Astronomy and Astrophysics* 415, 63-76 (2004)
- Mukadam, A. S., F. Mullally, R. E. Nather, D. E. Winget, T. von Hippel, S. J. Kleinman, A. Nitta, J. Krzesinski, S. O. Kepler, A. Kanaan, D. Koester, D. J. Sullivan, D. Homeier, S. E. Thompson, D. Reaves, C. Cotter, D. Slaughter, J. Brinkmann: Thirty-five new pulsating DA white dwarf stars. *The Astrophysical Journal* 607, 982-998 (2004)
- O'Driscoll, S., N. J. Smith: The realization of an automated data reduction pipeline in IRAF: the PhotMate system. In: *Ground-based Telescopes*, (Ed.) J. M. Oschmann. SPIE 5493, SPIE, 491-501 (2004)
- Patat, F., S. Benetti, A. Pastorello, A. V. Filippenko, J. Aceituno: Supernova 2004dj in NGC 2403. *International Astronomical Union Circular* 8378, 1 (2004)
- Patat, F., G. Pignata, S. Benetti, J. Aceituno: Supernova 2004dt in NGC 799. *International Astronomical Union Circular* 8387, 3 (2004)
- Patat, F., G. Pignata, S. Benetti, J. Aceituno: Supernova 2004dn in UGC 2069. *International Astronomical Union Circular* 8381, 2 (2004)
- Patat, F., G. Pignata, S. Benetti, J. Aceituno: Supernova 2004dk in NGC 6118. *International Astronomical Union Circular* 8379, 3 (2004)
- Pignata, G., F. Patat, S. Benetti, A. Harutyunyan: Supernova 2004bs in NGC 3323. *International Astronomical Union Circular* 8344, 2 (2004)
- Pohlen, M., M. Balcells, R. Lütticke, R.-J. Dettmar: Thick disks of lenticular galaxies. 3D-photometric thin/thick disk decomposition of eight edge-on s0 galaxies. *Astronomy and Astrophysics* 422, 465-475 (2004)
- Przybilla, N., K. Butler: Non-LTE line formation for hydrogen revisited. *The Astrophysical Journal* 609, 1181-1191 (2004)
- Randall, S., G. Fontaine, E. Green, D. Kilkeny, L. Crause, O. Cordes, S. O'Toole, L. Kiss, B.-Q. For, P.-O. Quirion: A multi-site campaign on the long period variable subdwarf B star PG 1627+017. *Astrophysics and Space Science* 291, 465-471 (2004)
- Reed, M. D., S. D. Kawaler, S. Zola, X. J. Jiang, S. Dreizler, S. L. Schuh, J. L. Deetjen, R. Kalytis, E. Meistas, R. Janulis, D. Alisauskas, J. Krzesinski, M. Vuckovic, P. Moskalik, W. Ogloza, A. Baran, G. Stachowski, D. W. Kurtz, J. M. González Pérez, A. Mukadam, T. K. Watson, C. Koen, P. A. Bradley, M. S. Cunha, M. Kilic, E. W. Klumpe, R. F. Carlton, G. Handler, D. Kilkeny, R. Riddle, N. Dolez, G. Vauclair, M. Chevreton, M. A. Wood, A. Grauer, G. Bromage, J. E. Solheim, R. Ostensen, A. Ulla, M. Burleigh, S. Good, Ö. Hürkal, R. Anderson, E. Pakstiene: Observations of the pulsating subdwarf B star Feige 48: Constraints on evolution and companions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 348, 1164-1174 (2004)
- Reiners, A., F. Royer: Altair's inclination from line profile analysis. *Astronomy and Astrophysics* 428, 199-204 (2004)
- Rodríguez-Gil, P., B. T. Gänsicke, S. Araujo-Betancor, J. Casares: DW Cancri: a magnetic VY Scl star with an orbital period of 86 min. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 349, 367-374 (2004)
- Rodríguez-Gil, P., B. T. Gänsicke, H. Barwig, H.-J. Hagen, D. Engels: Time-resolved photometry and spectroscopy of the new deeply-eclipsing SW Sextantis star HS 0728+6738. *Astronomy and Astrophysics* 424, 647-655 (2004)
- Roth, M. M., T. Becker, P. Böhm, A. Kelz: Science verification results from PMAS. *Astronomische Nachrichten* 325, 147-150 (2004)
- Roth, M. M., T. Becker, A. Kelz, P. Böhm: Faint object 3D spectroscopy with PMAS. In: *UV and Gamma-Ray Space Telescope Systems*, (Eds.) G. Hasinger, M. J. L. Turner. SPIE 5492, SPIE, 731-738 (2004)
- Roth, M. M., T. Becker, A. Kelz, J. Schmoll: Spectrophotometry of planetary nebulae in the bulge of M31. *The Astrophysical Journal* 603, 531-547 (2004)
- Roth, M. M., T. Fechner, T. Becker, A. Kelz: Nod-shuffle 3D spectroscopy with PMAS. In: *Optical and Infrared Detectors for Astronomy*, (Eds.) J. D. Garnett, J. W. Beletic. SPIE 5499, SPIE, 387-394 (2004)
- Roth, M. M., T. Fechner, D. Wolter, A. Kelz, T. Becker: Ultra-deep optical spectroscopy with PMAS. In: *Scientific detectors for astronomy, the beginning of a new era*, (Eds.) P. Amico, J. W. Beletic, J. E. Beletic. Kluwer, 371-377 (2004)
- Salvato, M., J. Greiner, B. Kuhlbrodt: Multiwavelength scaling relations for nuclei of Seyfert galaxies. *The Astrophysical Journal* 600, L31-L34 (2004)
- Sánchez, S. F., T. Becker, A. Kelz: E3D, the Euro3D visualization tool II: Mosaics, VIMOS data and large IFUs of the future. *Astronomische Nachrichten* 325, 171-174 (2004)
- Sánchez, S. F., L. Christensen, T. Becker, A. Kelz, K. Jahnke, C. R. Benn, B. García-Lorenzo, M. M. Roth: The merging/AGN connection: A case for 3D spectroscopy. *Astronomische Nachrichten* 325, 112-115 (2004)
- Scholz, A., J. Eisloffel: RJHKs photometry of sigma Ori low-mass stars. *VizieR Online Data Catalog* 341, 90249 (2004)
- Scholz, A., J. Eisloffel: Rotation periods for very low mass stars in the Pleiades. *Astronomy and Astrophysics* 421, 259-271 (2004)

- Shi, J. R., T. Gehren, G. Zhao: Sodium abundances in near-by disk stars. *Astronomy and Astrophysics* 423, 683-691 (2004)
- Snellen, I. A. G., K.-H. Mack, R. T. Schilizzi, W. Tschager: The CORALZ sample – I. Young radio-loud active galactic nuclei at low redshift. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 348, 227-234 (2004)
- Thuan, T. X., F. E. Bauer, P. Papaderos, Y. I. Izotov: Chandra observations of the three most metal deficient blue compact dwarf galaxies known in the local universe, SBS 0335-052, SBS 0335-052W, and I Zw 18. *The Astrophysical Journal* 606, 213-220 (2004)
- Weis, K., D. J. Bomans, S. Klose, F. Spiller: Supernova 2004dj in NGC 2403. *International Astronomical Union Circular* 8384, 4 (2004)
- Wilson, G., J.-S. Huang, P. G. Pérez-González, E. Egami, R. J. Ivison, J. R. Rigby, A. Alonso-Herrero, P. Barmby, H. Dole, G. G. Fazio, E. Le Floc'h, C. Papovich, D. Rigopoulou, L. Bai, C. W. Engelbracht, D. Frayer, K. D. Gordon, D. C. Hines, K. A. Misselt, S. Miyazaki, J. E. Morrison, G. H. Rieke, M. J. Rieke, J. Surace: Extremely red objects in the Lockman Hole. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 154, 107-111 (2004)
- Wisotzki, L., T. Becker, L. Christensen, K. Jahnke, A. Helms, A. Kelz, M. M. Roth, S. F. Sánchez: Integral field spectrophotometry of gravitationally lensed QSOs with PMAS. *Astronomische Nachrichten* 325, 135-138 (2004)
- Wisotzki, L., P. L. Schechter, H.-W. Chen, D. Richstone, K. Jahnke, S. F. Sánchez, D. Reimers: HE 0047-1756: A new gravitationally lensed double QSO. *Astronomy and Astrophysics* 419, L31-L34 (2004)
- Zapatero Osorio, M. R., E. L. Martín: A CCD imaging search for wide metal-poor binaries. *Astronomy and Astrophysics* 419, 167-180 (2004)
- Zeh, A., S. Klose, D. H. Hartmann: A systematic analysis of supernova light in gamma-ray burst afterglows. *The Astrophysical Journal* 609, 952-961 (2004)



Lageplan

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. Als Nachfolgeorganisation der 1911 gegründeten Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft betreibt sie in ihren derzeit 88 Instituten und Einrichtungen erkenntnisorientierte und anwendungsoffene Grundlagenforschung. Bei einem Jahresetat von rund 1.33 Milliarden Euro im Jahr 2004 beschäftigt sie rund 12000 Mitarbeiter, von denen etwa ein Drittel Wissenschaftler und ein Drittel Techniker sind. Zusätzlich forschen im Jahresverlauf rund 10000 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