



Max-Planck-Institut für Astronomie

Heidelberg-Königstuhl

Jahresbericht

2001



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Zum Titelbild:

Infrarotbild des Saturn, aufgenommen mit dem adaptiv-optischen System NAOS und der Infrarotkamera CONICA am 8.2-Meter-Teleskop YEPUN des VLT auf dem Cerro Paranal in den Chilenischen Anden (ESO). Die Aufnahme entstand kurz nach der Inbetriebnahme von NAOS-CONICA im November 2001. Mit dieser Anordnung wird das beugungsbegrenzte Auflösungsvermögen des Großteleskops erreicht. Die Federführung des für Entwicklung und Bau von CONICA zuständigen Konsortiums lag beim MPIA. Ausführlicher Bericht auf S. 13 – 17.

Max-Planck-Institut für Astronomie

Heidelberg-Königstuhl

Jahresbericht

2001



Max-Planck-Institut für Astronomie

Wissenschaftliche Mitglieder, Kollegium, Direktoren:

Prof. Thomas Henning (ab 1. 11. 2001),
Prof. Hans-Walter Rix (Geschäftsführender Direktor)

Emeritierte wissenschaftliche Mitglieder:

Prof. Hans Elsässer, Prof. Guido Münch

Auswärtige Wissenschaftliche Mitglieder:

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

Fachbeirat:

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

Mitarbeiter:

Ende 2001 waren insgesamt 185 Mitarbeiter (einschließlich der Drittmittelbeschäftigten) am Institut tätig, darunter 35 Wissenschaftler; dazu kamen im Berichtsjahr 43 Nachwuchs- und Gastwissenschaftler.

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

Telefon: 0049-6221-5280, *Fax:* 0049-6221-528 246

E-Mail: Sekretariat@mpia.de

Anonymous ftp: ftp.mpia.de

Isophot Datacenter: phthelp@mpia.de

Internet: <http://www.mpia.de>

Calar-Alto-Observatorium

Anschrift: Centro Astronómico Hispano Alemán,

Calle Jesús Durbán 2/2, E-04004 Almería, Spanien

Telefon: 0034-50-230 988, - 632 500, *Fax:* 0034-50-632 504

E-Mail: name@caha.de

Impressum

© 2002 Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg

Alle Rechte vorbehalten. Printed in Germany

Herausgeber: Dr. Jakob Staude, Prof. Hans-Walter Rix

Text: Dr. Thomas Bührke

Bilder: MPIA und andere

Graphik und Bildbearbeitung: Dipl.-Phys. Axel M. Quetz, Martina Weckauf, Karin Meißner-Dorn

Layout: Marita Beyer, Modautal

Druck: Laub GmbH + Co., Elztal-Dallau

ISSN 1437-2924; Internet: ISSN 1617 – 0490

Inhalt

I Allgemeines.....	5	Aktive Sternentstehung in CB 34	40
I.1 Forschungsziele des MPIA	5	Die Entstehung von CB 34	42
Zielsetzung des Instituts	5	Interstellarer Eisstaub	43
Geschichtlicher Rückblick.....	5	Das Kern-Mantel-Modell für Staubteilchen	44
Internationale Zusammenarbeit in der		Nachweis von Eisstaub mit ISOPHOT	44
bodengebundenen Astronomie.....	7	Entstehung von Doppelsternen:	
Adaptive Optik und Interferometrie	9	Neue Antworten und neue Fragen	47
Extraterrestrische Forschung	10	Entwicklung der Umlaufperioden.....	49
Lehre und Öffentlichkeitsarbeit.....	11	Die frühe chemische Entwicklung des	
		Milchstraßensystems	50
		Ein Modell der chemischen und dynamischen	
		Entwicklung des Halos	51
		Zeitliche Entwicklung der Metallhäufigkeiten	51
II Highlights	13	IV.2 Extragalaktische Astronomie	54
II.1. NAOS-CONICA:		Das tiefste Bild im Infraroten – Inventur der	
die Höchstleistungskamera am VLT.....	13	stellaren Massen hoch rotverschobener Galaxien	54
Adaptive Optik.....	15	Der Faint Infrared Extragalactic Survey (FIRES)	54
NAOS-CONICA und HUBBLE im Vergleich.....	15	Helle und massereiche Galaxien im	
Erste Ergebnisse, zukünftige Aufgaben.....	16	frühen Universum	56
		Eine ungewöhnlich große Scheibengalaxie	
		bei $z = 3$	57
		Alte Galaxien bei $z = 2$?	57
		Grenzen und zukünftige Aufgaben	58
II.2. Entferntester Quasar durchleuchtet Urmaterie	18	Staub in Galaxienhaufen.....	58
Die Re-Ionisationsphase	18	Der Jet des Quasars 3C 273.....	61
Beobachtung der entferntesten Quasare	18	Teilchenbeschleunigung und Synchrotron-	
Der Sloan Digital Sky Survey (SDSS).....	20	strahlung	62
		Beobachtungen mit dem HST und dem VLA.....	63
		Zwei Populationen von Elektronen	63
II.3. COMBO-17 enthüllt Dunkle Materie		Spiralsysteme im Innern Elliptischer Galaxien	64
in Galaxienhaufen	21	Simulationen der Kinematik	66
Die Strategie von COMBO-17.....	21	Dunkle Materie und Galaxienentstehung	70
Der schwache Gravitationslinseneffekt im		Der Drehimpuls im Halo und in den Scheiben.....	70
Superhaufen Abell 901/902	21	Der Himmelshintergrund im fernen Infrarot	72
Dunkle Materie in den Abell-Haufen	25	Confusion noise.....	73
		Die extragalaktische Hintergrundstrahlung	74
III Instrumentelle Entwicklungen.....	27	IV.3 Das Sonnensystem	75
Adaptive Optik	27	ISO beobachtet Staub und Eis beim Kometen	
Multikonjugierte adaptive Optik (MCAO)	28	Hale-Bopp	75
LUCIFER und LINC – zwei Instrumente für das LBT ...	29	Staub und Eis in Hale-Bopps Koma	76
OMEGA 2000 – Weitfeld-Infrarotkamera für den			
Calar Alto	31	Personal	79
LAICA – die Weitfeldkamera für den Calar Alto	32	Arbeitsgruppen	80
MIDI – Infrarotinterferometer für das VLT.....	33	Zusammenarbeit mit Firmen	82
PACS – Infrarotkamera für Herschel (ehemals FIRST)....	34	Lehrveranstaltungen	84
		Tagungen, Öffentliche Vorträge	84
IV Wissenschaftliche Arbeiten.....	37	Mitarbeit in Gremien.....	86
IV.1 Galaktische Astronomie	37	Veröffentlichungen.....	87
Entwicklungsphasen von Bok-Globulen	37		
Barnard 68 – eine Globule kurz vor dem Kollaps? ..	37		

I Allgemeines

I.1 Forschungsziele des MPIA

Zielsetzung des Instituts

Von der Entstehung und Entwicklung des Universums als Ganzes bis zur Entstehung von Sternen und Planeten – Ziel des MPIA ist es, die astrophysikalische Forschung durch den Bau von Teleskopen und Messinstrumenten, durch direkte Beobachtungen und durch die Interpretation der gewonnenen Messdaten auf Weltniveau voranzutreiben. Die technologischen Entwicklungen sind auf Instrumentierung im optischen und infraroten Wellenlängenbereich sowohl für erdgebundene als auch für weltraumgestützte Beobachtungen fokussiert.

Die wissenschaftlichen Arbeiten zielen in der einen wissenschaftlichen Abteilung darauf ab, die Entstehung und Entwicklung von Galaxien, von deren Kernen und Sternpopulationen, vom Urknall zum heutigen Zustand zu

verstehen. Forschungsziel der anderen Abteilung ist es, die Entstehung von Sternen zu untersuchen, sowie Planeten um andere Sterne zu entdecken und deren Entstehung und Eigenschaften zu studieren.

Geschichtlicher Rückblick

Der Senat der Max-Planck-Gesellschaft beschloss im Jahre 1967 die Gründung des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg mit dem Ziel, die astronomische Forschung in Deutschland an die Weltspitze heran-

Abb.I.1: Das Max-Planck-Institut für Astronomie auf dem Königstuhl in Heidelberg. Im Hintergrund die Landessternwarte und das Neckartal.





Abb.I.2: Das Calar-Alto-Observatorium. Blick von Westen aus auf die Kuppeln des Schmidt-Teleskops, des 1.2-m-Teleskops, des 2.2-m-Teleskops und des 3.5-m-Teleskops (v.l.n.r.).

zuführen. Zwei Jahre später nahm das Institut auf dem Königstuhl zunächst in provisorischen Räumen die Arbeit auf, 1975 wurde das neue Institutsgebäude bezogen (Abb. I.1). Als langfristiges Ziel wurde dem MPIA der Aufbau und Betrieb zweier leistungsfähiger Observatorien jeweils auf der Nord- und Südhalbkugel übertragen. Für die Nordhalbkugel entschied man sich für den 2168 Meter hohen Berg Calar Alto in der Provinz Almeria, Südspanien. Er bietet in Europa gute klimatische und meteorologische Bedingungen für astronomische Beobachtungen. 1972 kam es zur Gründung des „Deutsch-Spanischen Astronomischen Zentrums“ (DSAZ), kurz Calar-Alto-Observatorium.

Von 1975 bis 1984 gingen auf dem Calar Alto (Abb. I.2) der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierte 1.2-Meter-Reflektor sowie das 2.2-Meter- und das 3.5-Meter-Teleskop in Betrieb. Mit dem Calar-Alto-Observatorium verfügt das MPIA über eines der beiden leistungstärksten Sternwarten in Europa.

Heute betreibt das MPIA das Calar-Alto-Observatorium, welches allen deutschen Astronomen zur Verfügung steht, und sorgt dafür, dass es international wettbewerbsfähig bleibt. Dazu gehört die Entwicklung neuer Instrumentierung für die Teleskope und die Vorbereitung der Beobachtungsprogramme.

Der ursprünglich geplante Bau einer Südsternwarte auf dem Gamsberg in Namibia ließ sich aus politischen Gründen nicht realisieren. Das hierfür vorgesehene 2.2-Meter-Teleskop wurde der Europäischen Südsternwarte (ESO) für 25 Jahre als Leihgabe überlassen. Es arbeitet seit 1984 auf dem Berg La Silla in Chile und steht dort zu 25 % der Beobachtungszeit den Astronomen des MPIA zur Verfügung.

Überdies engagiert sich das MPIA seit seiner Gründung in der extraterrestrischen Forschung. Insbesondere der damit verbundene frühzeitige Einstieg in die Infrarot-astronomie war für gesamte spätere Entwicklung des Instituts von Bedeutung. In den 70er Jahren wurden am MPIA zwei Photometer entwickelt und gebaut, die auf den beiden Sonnensonden **HELIOS 1 und 2** geflogen sind. Etwa parallel lief die Entwicklung des Infrarotteleskops **THISBE** (Telescope of Heidelberg for Infrared Studies by Balloon-borne Experiments). Es gelangte an einem Hö-



Abb. I.3: Präsentation der Montierung des Large Binocular Telescope im November 2001. (Bild: Carlucci)

henforschungsballon bis in 40 Kilometer Höhe, wo bereits Infrarotbeobachtungen möglich sind.

Das MPIA war wesentlich am weltweit ersten Infrarot-Weltraumobservatorium **ISO** der Europäischen Weltraumbehörde ESA beteiligt: **ISOPHOT**, eines von vier Messinstrumenten auf ISO, entstand unter der Federführung eines Principal Investigators Instituts. ISO lieferte mehr als zwei Jahre lang brillante Daten und wurde am 8. April 1998 abgeschaltet, nachdem sein Kühlmittelvorrat erschöpft war.

Internationale Zusammenarbeit in der bodengebundenen Astronomie

Das MPIA ist, zusammen mit der University of Arizona und italienischen Instituten, einer der großen Partner in einem internationalem Konsortium, zum Bau des **Large Binocular Telescope** (LBT, Abb. I.3). Das LBT ist ein Doppelfernrohr, in dem zwei Spiegel mit einem Durchmesser von jeweils 8.4 Metern in einer gemeinsamen Montierung angebracht werden. Beide Spiegel verfügen

zusammen über eine Lichtsammelkraft, die einem einzelnen 11.8-Meter-Spiegel gleich kommt. Damit wird das LBT das weltweit leistungsstärkste Einzelteleskop sein. Zudem ist geplant, das Doppelfernrohr für interferometrische Beobachtungen einzusetzen. Dann entspricht sein räumliches Auflösungsvermögen dem eines Spiegels mit 22.8 Metern Durchmesser. Erstes Licht mit nur einem Hauptspiegel ist derzeit für Mitte 2004 geplant, ein Jahr später soll das gesamte Teleskop in Betrieb gehen.

Die deutschen Partner bauen unter der Leitung der Heidelberger Landesternwarte für das LBT den Nahinfrarot-Spektrographen **LUCIFER** (Kapitel III). 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 (Beam combiner) **LINC**. Letztlich soll Interferometrie über einen Wellenlängenbereich von $0.6 \mu\text{m}$ bis $2.2 \mu\text{m}$ möglich sein. Dies erfordert ein äußerst anspruchsvolles optisches Design. Außerdem wurde ein informelles Konsortium mit Kollegen von der Universität Köln und dem Astrophysikalischen Institut in Arcetri, Italien, gebildet.



Abb.I.4: Das Very Large Telescope in den chilenischen Anden.
(Bild: ESO)

Ein wesentlicher Teil der Institutsarbeit ist dem Bau neuer Instrumente für Calar Alto und LBT, sowie für das Very Large Telescope (VLT) der ESO gewidmet (Kapitel III). Dazu ist das MPIA mit modernsten Feinwerk- und Elektronikwerkstätten ausgestattet.

Von wesentlicher Bedeutung sind auch Beteiligungen an multinationalen Observatorien und Projekten. So ging im Berichtsjahr am Very Large Telescope, VLT, der ESO auf dem Paranal in Chile (Abb. I.4) die hochauflösende Infrarotkamera **CONICA** in Betrieb. Diese mit adaptiver Optik ausgestattete Kamera konnte die in sie gesetzten Erwartungen voll erfüllen und bildete ein Highlight der Institutsarbeit im Jahr 2001 (Kapitel II.1).

Der Bau von **MIDI**, einem interferometrischen Instrument für das VLT, ging rasch voran. Mit diesem zukunftsweisenden Gerät soll es ab dem Jahre 2002 erstmals möglich sein, zwei Großteleskope im Infraroten interferometrisch zu koppeln.

Das MPIA ist auch am **Sloan Digital Sky Survey (SDSS)** beteiligt. Dies ist die bislang umfangreichste Himmelsdurchmusterung, bei der etwa ein Viertel des gesamten Himmels in fünf Farbfiltern aufgenommen wird. Der endgültige Katalog wird Positionen und Farben von schätzungsweise hundert Millionen Himmelskörpern sowie die Rotverschiebungen von etwa einer Million Galaxien und Quasare umfassen. Die Beobachtungen werden mit einem eigens für diesen Zweck gebauten 2.5-Meter-Teleskop am Apache Point Observatory in New Mexico ausgeführt (Abb. I.5). Das Projekt wird von einem internationalen Konsortium amerikanischer, japanischer und deutscher Institute durchgeführt. In Deutschland sind das Heidelberger MPIA und das MPI für Astrophysik in Garching beteiligt. Für die Sach- und Geldbeiträge des MPIA zum SDSS erhalten eine begrenzte Zahl an Mitarbeitern des MPIA die vollen Datenrechte. Nach einer Testphase von etwas mehr als einem Jahr begann der Survey offiziell im April 2000.

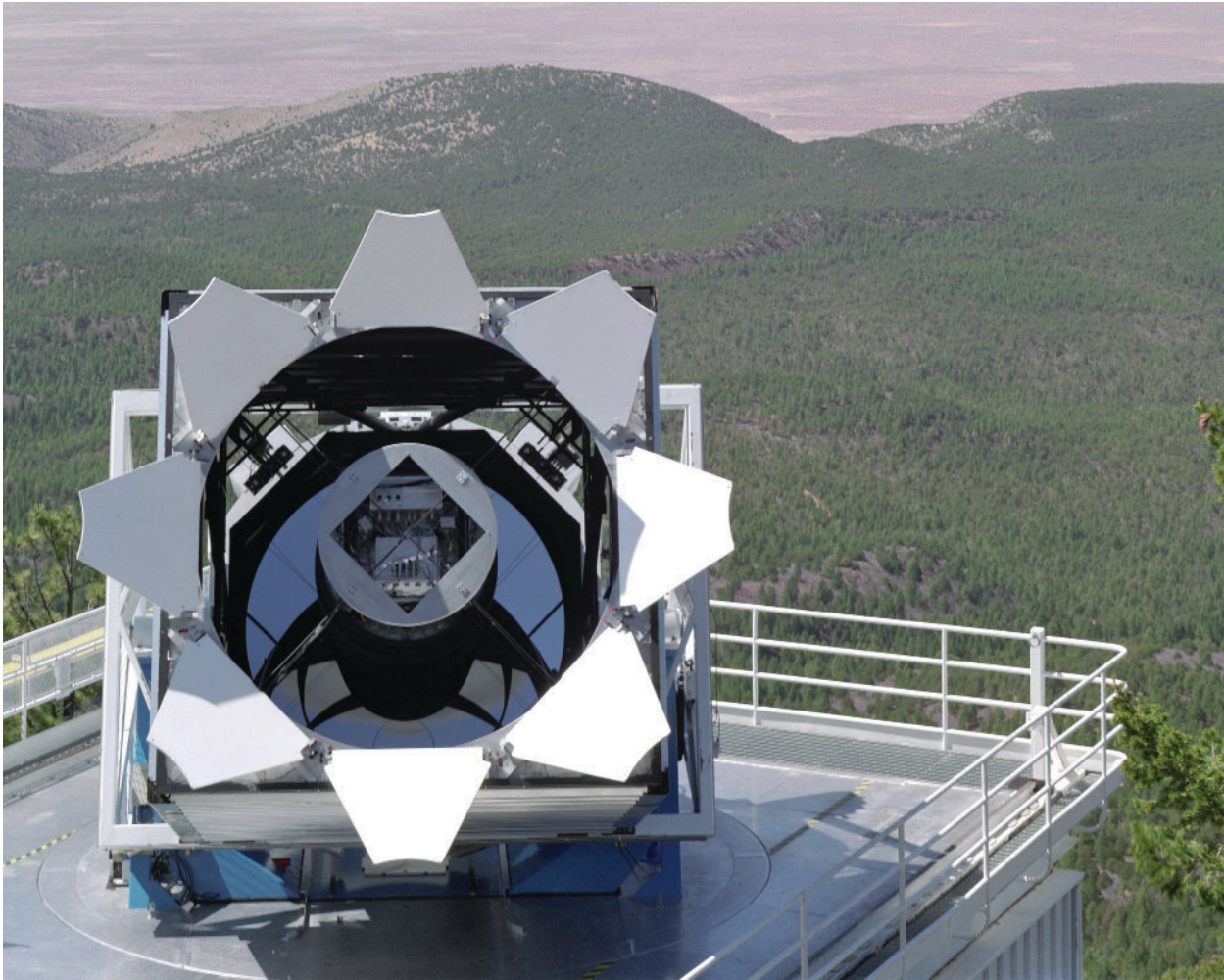


Abb. I.5: Das 2,5-Meter-Teleskop des Sloan Digital Sky Survey. (Bild: SDSS)

Adaptive Optik und Interferometrie

Die Forschung konzentriert sich auf den "klassischen" sichtbaren und den infraroten Spektralbereich, wobei auf die Weiterentwicklung neuer Techniken größten Wert gelegt wird. So leistete das Institut mit dem Aufbau des Systems **ALFA** mit künstlichem Laserleitstern einen wesentlichen Beitrag zu der neuen Technik der adaptiven Optik. Derzeit wird diese Forschungsrichtung mit der Entwicklung eines Systems der multikonjugierten adaptiven Optik weitergeführt (Kapitel III). Die hierbei gewonnenen Erfahrungen werden zukünftig in der Entwicklung neuer Instrumente am Very Large Telescope und am Large Binocular Telescope umgesetzt.

Auch der Aufbau eines **deutschen Zentrums für Interferometrie (FrInGe)** mit Sitz am MPIA unterstreicht die konsequente Ausrichtung des Instituts auf zukünftige astronomische Techniken. Die Interferometrie im opti-

schen und infraroten Wellenlängenbereich hat in der jüngsten Vergangenheit weltweit einen großen Aufschwung genommen. Wegweisend sind hier vor allem die jüngsten Erfolge am Very Large Telescope Interferometer (VLTI). In absehbarer Zukunft werden dort die Instrumente MIDI und AMBER erste wissenschaftliche Daten liefern.

Mit interferometrischen Instrumenten lassen sich an bodengebundenen Teleskopen Beobachtungen mit bislang unerreichter räumlicher Auflösung erzielen. Darüber hinaus soll präzise Astrometrie den Nachweis von sich bewegenden Himmelskörpern ermöglichen, insbesondere die Bewegung von Sternen, die durch umlaufende Planeten verursacht wird.

In der Interferometrie sind die Planung und Durchführung der Beobachtungen sowie die anschließende Auswertung und Interpretation der Daten sehr viel enger miteinander verknüpft als in der herkömmlichen Astronomie. So beeinflusst die genaue Bauweise des jeweiligen Instruments stark die Technik der Dateninterpretation – und umgekehrt.

Um dieser Entwicklung Rechnung zu tragen, wurde im September 2001 das deutsche Interferometriezentrum FrInGe (Frontiers of Interferometry in Germany) gegründet, mit dem Ziel, die Anstrengungen deutscher Institute

auf diesem Gebiet zu koordinieren. FrInGe soll Geräte und Software zusammenführen, die an den beteiligten Institute entwickelt wurden. So entwickelt eine Gruppe am MPIA derzeit eine Software zur Planung interferometrischer Beobachtungen.

FrInGe ist am MPIA angesiedelt und folgende Institute sind Mitglieder des Konsortiums: das Astrophysikalische Institut Potsdam, das Astrophysikalische Institut und Universitäts-Sternwarte der Universität Jena, das Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg, das MPI für extraterrestrische Physik, Garching, das MPI für Radioastronomie, Bonn, und das I. Physikalische Institut der Universität zu Köln.

Ein weiteres Ziel von FrInGe besteht in der Vorbereitung der nächsten Generation interferometrischer Instrumente. Dazu zählt die Erweiterung von VLTI und eine Beteiligung an der Vorbereitung der Weltraummission Darwin.

FrInGe wird die Kooperation mit anderen Interferometriezentren in Europa suchen. Langfristiges Ziel ist die Einrichtung eines europäischen Interferometriezentrums für den optischen und infraroten Wellenlängenbereich.

Extraterrestrische Forschung

Zum einen erstrecken sich die laufenden Arbeiten am MPIA auf die wissenschaftliche Ausbeute der ISO Mission.

Im letzten Jahr der ISO Postoperation Phase (Beginn 1998) wurden im Rahmen des ISOPHOT-Datenzentrums am MPIA die Arbeiten zur Programmentwicklung und Kalibrationsanalyse für die Version 10 der automatischen Datenanalyse abgeschlossen. Dies war die letzte Verbesserung der im ISO-Datenzentrum in VILSPA, Spanien, laufenden Software. Mit ihr wurde das ISO Legacy Archiv erzeugt.

Das ISOPHOT-Datenzentrum in Heidelberg hatte im Berichtsjahr acht Besucher mit mehrtägigem Aufenthalt. Bis zum Jahresende 2001 sind etwa 190 Veröffentlichungen mit ISOPHOT-Daten in Zeitschriften mit Referee-System erschienen, das entspricht der Bearbeitung von ca. 25 % der wissenschaftlichen Datenbasis. Im Sommer begann die Vorbereitung für die fünfjährige aktive Archivphase, die sich an die Postoperations-Phase anschließt, und die sich der Bearbeitung der restlichen 75 % der Daten und der Steigerung von Genauigkeit und Nutzerfreundlichkeit des ISO-Daten-Archives widmen wird. In dieser Phase wird die ISO-Datenbasis zum Bestandteil eines weltweit zugänglichen „Virtuellen Observatoriums“ für alle Wellenlängenbereiche ausgebaut.

Auf wissenschaftlicher Seite gab es eine ganze Reihe wichtiger Arbeiten. Hierzu zählen die Beobachtung von interstellarem Eisstaub (Kap. IV.1), die Fertigstellung von Studien über intergalaktischen Staub (Kap. IV.2) und die Beobachtung des Kometen Hale-Bopp (Kap. IV.3).

Die mit ISOPHOT gemachten Erfahrungen waren ausschlaggebend dafür, dass das MPIA an dem Bau der **Infrarotkamera und -spektrometer PACS** wesentlich beteiligt ist. Sie wird an Bord des europäischen Infrarotobservatoriums HERSCHEL (vormals Far-Infrared and Submillimeter Telescope, FIRST) arbeiten (Kap. III). Der Start dieses 3.5-Meter-Weltraumteleskops ist für das Jahr 2007 vorgesehen.

Darüber hinaus wird das Institut voraussichtlich auch am Nachfolger des Weltraumteleskops HUBBLE, dem **New Generation Space Telescope (NGST)** (Abb. I.6) beteiligt sein. Das NGST soll als drittes Fokalebene-Instrument ein Gerät für den Spektralbereich des mittleren Infrarot von 5 μm bis 28 μm erhalten. Es besteht aus einer hochauflösenden Kamera und einem Spektrometer mittlerer Auflösung. Das Instrument soll je zur Hälfte von amerikanischen und europäischen Instituten gebaut werden, die für ihre Beiträge mit garantierter Beobachtungszeit honoriert werden. Das MPIA ist Teil des europäischen Konsortiums und bietet die Entwicklung aller Kryo-Mechanismen zur Positionierung der optischen Komponenten wie Gitter, Filterräder und Spiegel im Kryovakuum (Temperatur etwa 7 K) an. Auf diese Aufgabe ist das Institut durch die erfolgreichen Entwicklungen ISOPHOT und PACS gut vorbereitet. Im letzten Quartal des Berichtsjahres begann eine von der ESA finanzierte Phase-A-Studie unter Führung des ATC Edinburgh, zu der das MPIA mit den Arbeitspaketen Kryomechanismen und Elektrische Auslegung beiträgt.

Das Institut beteiligt sich an einem Satellitenexperiment, das die Johns Hopkins University in Baltimore der NASA vorgeschlagen hat. Das PRIME (Primordial Explorer) genannte Teleskop soll einen Großteil des Himmels im Wellenlängenbereich von 0.9 μm bis 3.4 μm bis zu einer scheinbaren Helligkeit von 24.5 mag. kartieren. PRIME wäre ein Vorläufer des geplanten HUBBLE-Nachfolgers, New Generation Space Telescope. Es bestünde aus einem 75-cm-Teleskop, das die Erde in einer kreisförmigen polaren Bahn in 650 km Höhe umkreist. Die Fokalebene ist über drei Spiegel in vier Wellenlängenkanälen aufgeteilt, die mit neu entwickelten Infrarot-Arrays bestückt werden.

Mit PRIME lässt sich innerhalb von drei Jahren ein Viertel des gesamten Himmels mit einer bis dahin unerreichten Empfindlichkeit durchmustern. Damit könnte dieses Teleskop auf allen Gebieten moderner Astronomie wesentlich neue Erkenntnisse bringen. Beispielsweise ließen sich mindestens 1000 Supernovae vom Typ Ia im Bereich $1 < z < 5$ finden und ihre Lichtkurve messen, Hunderte von Braunen Zwergen bis in eine Entfernung von 1000 pc, extrasolare Planeten der Größe Jupiters bis in eine Entfernung von 50 pc, Quasare bis $z = 25$ oder Protogalaxien bis $z = 20$ finden.

Die Industriestudie zur Machbarkeit des PRIME-Teleskops wurde Mitte des Jahres abgeschlossen und das Projekt auf der deutschen Seite dem Gutachterausschuss und dem DLR präsentiert. In internationaler Zusammenarbeit

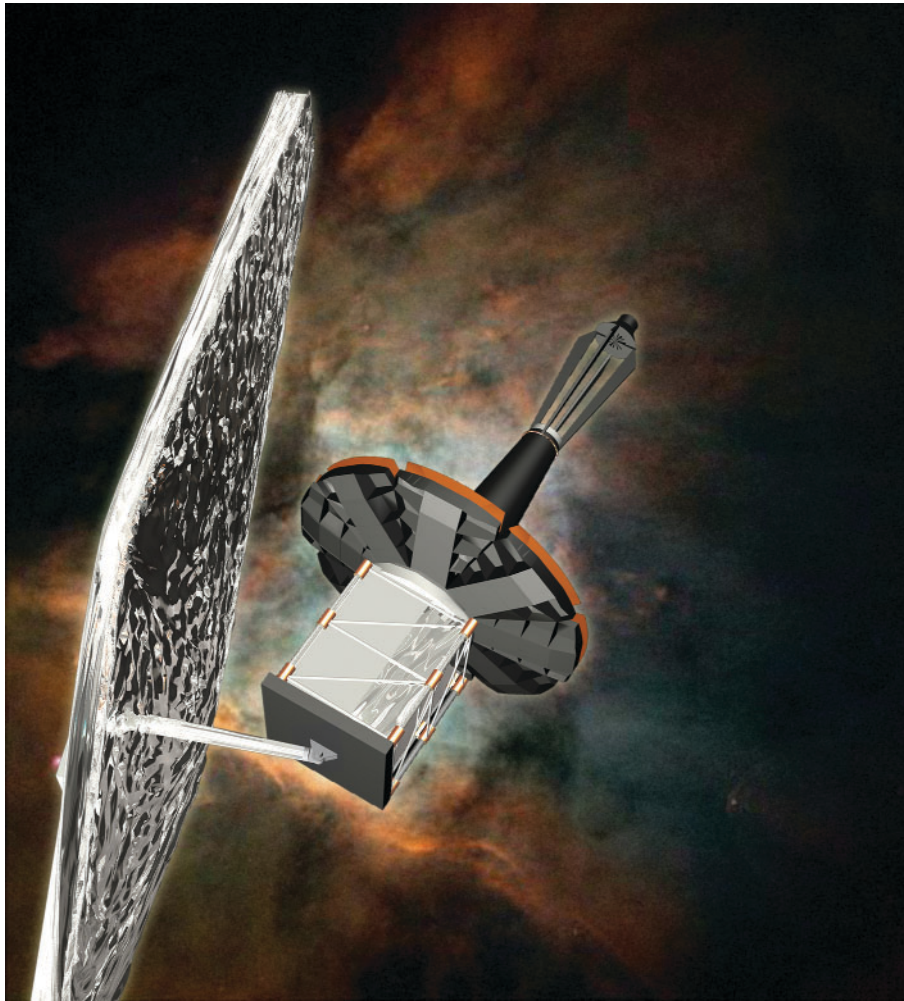


Abb. 1.6: Mögliche Konstruktion des NGST.
(Bild: Lockheed-Martin)

mit den beteiligten Instituten wurde der Phase-A-Bericht fertiggestellt und im Dezember an die NASA geliefert. Im Juli 2002 will die NASA über das Projekt entscheiden. Das MPIA würde die Beistellung des Teleskops übernehmen.

Mit diesem breit gefächerten Instrumentarium wird das MPIA auch zukünftig einen wesentlichen Beitrag zur astronomischen Forschung leisten können.

Lehre und Öffentlichkeitsarbeit

Zu den Aufgaben des Instituts gehört auch die Information einer breiten Öffentlichkeit über die Ergebnisse der astronomischen Forschung. So halten Mitglieder des Instituts Vorträge in Schulen, Volkshochschulen und Planetarien und treten, insbesondere anlässlich in der Öffentlichkeit stark beachteter astronomischer Ereignisse auf Pressekonferenzen oder in Radio- und Fernsehsendungen auf. Zahlreiche Besuchergruppen kommen zum MPIA auf dem Königstuhl und zum Calar-Alto-Observatorium. Regelmäßig im Herbst findet seit 1976 in den Räumen des MPIA eine bei Physik- und Mathematiklehrern in Baden-Württemberg sehr beliebte einwöchige Lehrerfortbildung statt.

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

I.2 Wissenschaftliche Fragestellungen

Die zentrale Frage aller kosmologischen und astronomischen Forschung gilt der Entstehung und Entwicklung des Universums als Ganzes sowie der Sterne und Galaxien, der Sonne und ihrer Planeten. An dieser Frage orientiert sich das Forschungsprogramm des MPIA.

Im Bereich der galaktischen Forschung konzentriert sich das Institut auf die Entstehung von Sternen in großen interstellaren Wolken aus Gas und Staub. Im Bereich der extragalaktischen Astronomie liegt der Schwerpunkt auf der Frage nach der großräumigen Struktur des Kosmos, der Suche nach den Uralgalaxien und der Erforschung aktiver Galaxien und Quasare. Dies sind ferne Sternsysteme mit einer enormen Strahlungsleistung. Unterstützt werden die beobachtenden Astronomen von einer Theoriegruppe, die in Computersimulationen Vorgänge nachvollzieht, die sich im Universum über Zehntausende oder Millionen von Jahren erstrecken. So kommt es zu einer fruchtbaren Synthese von Beobachtung und Theorie.

Galaktische Forschung

Ein Schwerpunkt der galaktischen Forschung am MPIA ist die Sternentstehung. Die ersten Phasen dieses Vorgangs spielen sich im Inneren der Staubwolken ab und bleiben somit 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.

Mit ISOPHOT ließen sich im Innern großer Staubwolken sehr kalte und dichte Gebiete nachweisen. Bei ihnen handelt es sich um protostellare Kerne, die kurz vor dem Kollaps stehen oder sich bereits zu Sternen zusammenziehen. Besonders interessant waren im Berichtsjahr Beobachtungen von Bok-Globulen, kleinen kompakten Dunkelwolken, in denen nur wenige Sterne entstehen können (Kap. IV.1). Auch zur Entstehung und Entwicklung von Doppelsternen – ein wichtiges Forschungsthema am Institut – gab es neue Erkenntnisse. (Kap. IV.1)

Extragalaktische Forschung

Die extragalaktische Forschung beschäftigt sich mit den Galaxien und Galaxienhaufen. Hier geht es hauptsächlich darum, die Entwicklung der Galaxien nachzuvollziehen. Wie war die Sternentstehungsrate im frühen Universum? Sind Galaxien miteinander verschmolzen, so dass sich ihre Gesamtzahl im Laufe von Jahrmilliarden verringert hat? Und welchen Einfluss hatte die Dunkle Materie auf diese Vorgänge? Dies sind nur drei der bedeutenden Fragen.

Einen großen Fortschritt bedeutete in diese Zusammenhang der Faint Infrared Extragalactic Survey (FIRES). Er kombiniert Aufnahmen des Weltraumteleskops HUBBLE im Optischen mit neuen Aufnahmen im nahen Infrarot, die mit dem Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte (ESO) gewonnen wurden. Dies sind die derzeit tiefsten und qualitativ besten Aufnahmen in diesem Wellenlängenbereich. Ziel ist es unter anderem, über einen weiten Rotverschiebungsbereich hinweg die Helligkeitsverteilung, Größen und Formen von Galaxien und die zeitliche Entwicklung ihrer stellaren Massen zu ermitteln. Die ersten Ergebnisse bestätigen die Strategie der Methode und haben bereits eine Reihe interessanter Fakten zu Tage gefördert (Kap. IV.2)

Große Rätsel gibt den Kosmologen nach wie vor die Dunkle Materie auf. Bislang sind weder deren Natur noch deren räumliche Verteilung bekannt. Astronomen des MPIA haben in Zusammenarbeit mit Kollegen aus Großbritannien die räumliche Verteilung der Dunklen Materie in Supergalaxienhaufen kartiert (Kap. II.3). Gleichzeitig gingen Theoretiker der Frage nach, auf welche Weise die Dunkle Materie in der Frühphase des Universums die Entstehung der Galaxien gefördert oder sogar eingeleitet haben könnte. Diese Arbeit verdeutlicht einmal mehr grundsätzliche Defizite im Verständnis der Dunklen Materie und deren Einfluss auf die Entwicklung des Universums.

II Highlights

II.1 NAOS-CONICA: die Höchstleistungskamera am VLT

Ende 2001 ging am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte die unter Leitung des MPIA gebaute Infrarotkamera CONICA in Betrieb. Gemeinsam mit dem in Frankreich gebauten adaptiv optischen System NAOS erreicht das Instrument das theoretisch mögliche Auflösungsvermögen des Großteleskops. Damit setzen Europas Astronomen neue Maßstäbe bei der bodengebundenen Beobachtung im nahen Infrarot.

Die vier Teleskope des VLT (Abb. II.1) bieten an ihren beiden Nasmyth-Foki und am Cassegrain-Fokus Platz für insgesamt zwölf wissenschaftliche Instrumente. NAOS-CONICA arbeitet am Nasmyth-Fokus des Teleskops YEPUN (auf deutsch Venus oder Abendstern) und ist auf den Bereich des nahen Infrarot ausgelegt.

CONICA (Coudé Near Infrared Camera) entstand unter der Federführung des MPIA. Beteiligt waren Kollegen des MPI für extraterrestrische Physik in Garching und der ESO. Das adaptiv optische System NAOS (Nasmyth Adap-

tive Optics System) wurde in Frankreich gebaut. Dem „ersten Licht“ am Teleskop (Abb. II.2) war eine zehn Jahre lange Planungs- und Bauphase vorausgegangen, in der neue Entwicklungen immer wieder zu konzeptionellen Änderungen zwangen. Die gravierendste konzeptionelle Änderung war nötig, als die ESO beschloss, CONICA nicht am Coudé-Fokus (Öffnungsverhältnis: $f/51$), sondern am Nasmyth-Fokus ($f/15$) zu installieren. Gleichzeitig mit dem Fokuswechsel beschloss die ESO, CONICA fest mit einem adaptiv optischen System zu verbinden.

Abb. II.1: Schematische Darstellung des VLT und seiner Instrumente. In Klammern die Daten des voraussichtlichen „First Light“. Das VST (Survey-Teleskop) ist ein 2.5-Meter-Teleskop mit sehr großem Gesichtsfeld, das für großflächige Durchmusterungen genutzt werden soll. Im unteren Teil erkennt man drei kleinere so genannte Auxiliary Telescopes. Sie werden zusätzlich zu den Großteleskopen für Interferometrie eingesetzt. (ESO)

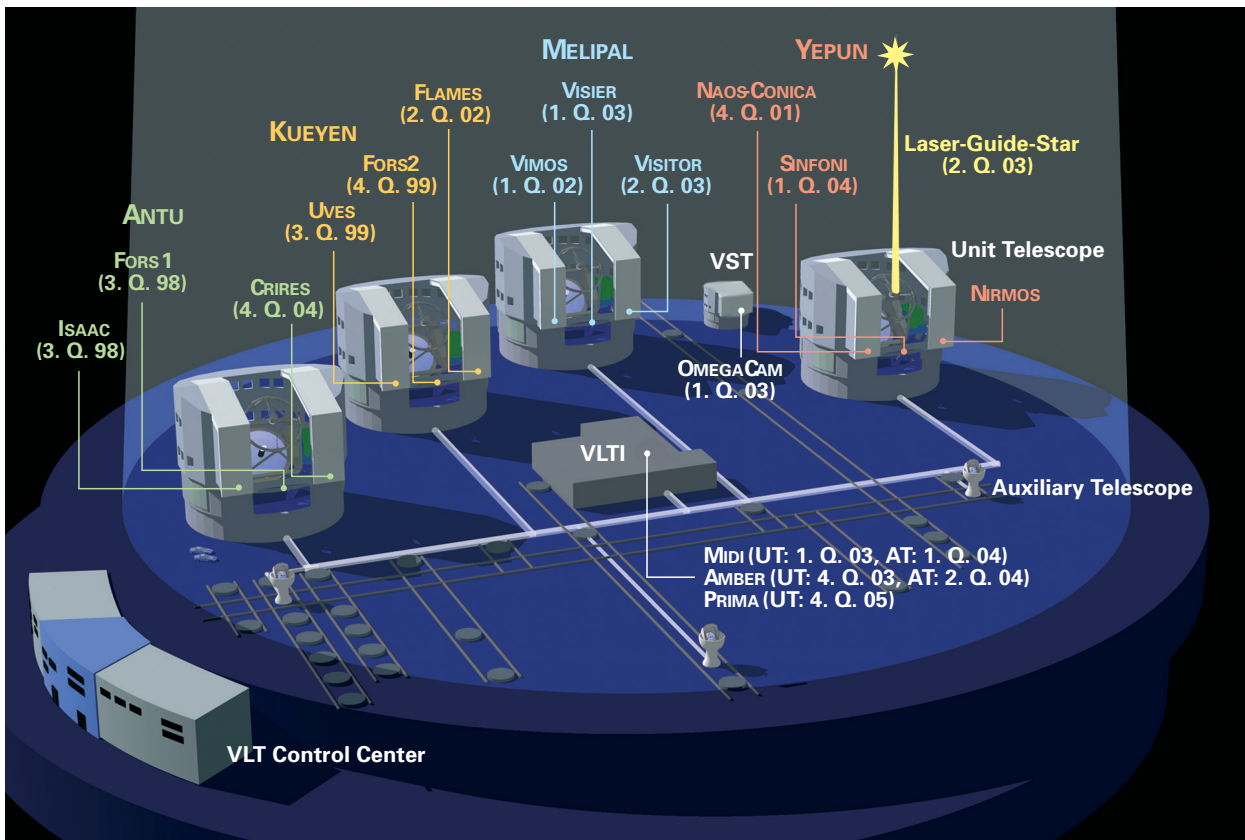




Abb. II.2: Das Heidelberger Team bei der Montage von CONICA am Nasmyth-Fokus des Teleskops YEPUN.

In den Bau von CONICA sind schätzungsweise 40 Mannjahre an Arbeit geflossen. Die Materialkosten von rund 2.3 Millionen Mark übernahm die ESO, während die MPIs ihren Maschinenpark und das Know-how ihrer Mitarbeiter einbrachten.

CONICA verfügt über mehrere Arbeitsmoden (Abb. II.3):

Direktaufnahmen: Insgesamt sieben Kameras mit unterschiedlichen Öffnungsverhältnissen sorgen für eine nahezu perfekte Abbildung. Sie sind auf einem großen Rad angebracht, mit dem sie sich in den Strahlengang drehen lassen. Vier Kameras arbeiten im Wellenlängenbereich von 1 μm bis 2.5 μm , drei von 2 μm bis 5 μm . Der Abbildungsmaßstab variiert zwischen 0.11 Bogensekunden pro Detektorpixel bei $f/6.4$ und 0.014 Bogensekunden pro Pixel bei $f/51$. Das Bildfeld ist ebenfalls vom Öffnungsverhältnis abhängig und verringert sich von 73 Bogense-

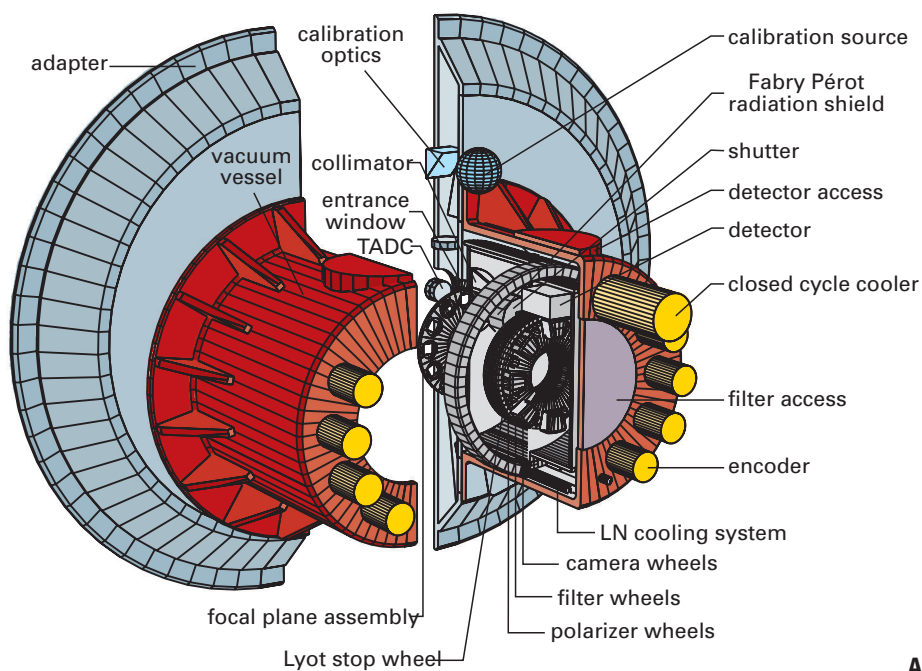


Abb. II. 3: Konzeption von CONICA.

kunden Kantenlänge ($f/6.4$) auf 14 Bogensekunden ($f/51$).

Polarimetrie: Die Messung von Polarisationsgrad und -winkel erlaubt wichtige Rückschlüsse beispielsweise auf die räumliche Verteilung von zirkumstellarem Staub. Für Beobachtungen dieser Art verfügt CONICA über vier Gitterpolarisatoren und zwei Wollaston-Prismen. Wahlweise kann das gesamte Instrument am Himmel stufenlos gedreht werden.

Spektroskopie: Die spektrale Energieverteilung der Infrarotstrahlung ermöglicht es, die Temperatur, Geschwindigkeit, Rotverschiebung oder auch die chemische Zusammensetzung von Körpern und Staub- und Gaswolken zu ermitteln. Hierfür befinden sich im Innern von CONICA vier so genannte Grisms – optische Elemente, die aus einem Prisma und einem Beugungsgitter bestehen. Sie ermöglichen über den gesamten Bereich von $1\ \mu\text{m}$ bis $5\ \mu\text{m}$ Spektroskopie mit geringer spektraler Auflösung ($200 < \lambda/\Delta\lambda < 1000$).

Hinzu kommen verschiedene *optische Elemente*. CONICA verfügt über etwa 40 Farbfilter, die auf zwei weiteren Rädern sitzen und ebenfalls einzeln in den Strahlengang gedreht werden können. Hierzu gehören auch eine Reihe von schmalbandigen Filtern sowie ein durchstimmbares Fabry-Pérot-Etalon. Damit ist es möglich, nach den spektralen Signaturen bestimmter Stoffe zu suchen. Ebenso lassen sich Spalte und koronographische Masken in die Brennebene schieben. Mit Letzteren kann der Beobachter helle Objekte abdecken, die nahe gelegene schwache Objekte überstrahlen.

Interessant ist auch ein einstellbarer *Dispersionskorrektor*. Er besteht aus zwei gegeneinander verdrehbaren Doppelpismen. Sie dienen dazu, die atmosphärische Dispersion (das ist die wellenlängenabhängige Brechung des Lichts in der Luft) zu korrigieren. Der Korrektor arbeitet im Wellenlängenbereich zwischen $1\ \mu\text{m}$ und $2.5\ \mu\text{m}$ bis zu Zenitdistanzen von 60 Grad.

Das Beobachten im Infraroten stellt besondere Anforderungen an die Instrumente, denn alle Körper geben bei Zimmertemperatur in diesem Wellenlängenbereich Wärmestrahlung ab. Um zu vermeiden, dass das Instrument von der eigenen Wärmestrahlung geblendet wird, muss man es stark kühlen. Ein geschlossenes Kühlsystem bringt das optische System und die Kameras auf -210 Grad Celsius und den Detektor sogar bis auf -240 Grad Celsius. Dieses Kryosystem erwies sich als eines der größten Probleme für die Stabilität des gesamten Instruments. Während einer langen Belichtung dreht sich nämlich die gesamte Kamera am Teleskop, weil sie die scheinbare Himmelsbewegung ausgleichen muss. Es musste daher dafür gesorgt werden, dass sich das eine Tonne schwere Gerät durch diese Bewegung um nicht mehr als wenige tausendstel Millimeter durchbiegt. Dies zu erreichen ist bei den thermisch isolierten kalten Teil von CONICA eine besonders harte Anforderung.

Adaptive Optik

Die Luftunruhe verhindert, dass große Teleskope ihr theoretisch mögliches Auflösungsvermögen, die so genannte Beugungsgrenze, erreichen. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass das Licht eines Himmelskörpers beim Durchgang durch die verschiedenen Luftschichten räumlich und zeitlich schnell veränderliche Störungen erfährt („Seeing“). Die ursprünglich ebene Wellenfront wird beim Durchgang durch die Atmosphäre gewellt, ähnlich wie ein Tuch im Wind. Dies führt bei länger belichteten Aufnahmen zu einem verwischten Bild.

Ein adaptiv optisches System ist in der Lage, das Seeing während der Beobachtung zu korrigieren (vgl. Jahresbericht 1998, S. 38). Hierbei kompensiert ein Kippspiegel eine Wanderbewegung des Bildpunktes auf dem Detektor. Weiterhin wird die „verbogene“ Welle wieder gerade gebogen, indem das Licht auf einen Spiegel gelangt, dessen Oberfläche derart verbogen ist, dass sie genau das entgegengesetzte Muster der Wellenfront aufweist. Nach der Reflexion an diesem adaptiven Spiegel ist die Deformation der Wellenfront behoben, und auf dem Detektor erscheint das unverzerrte, beugungsbegrenzte Bild.

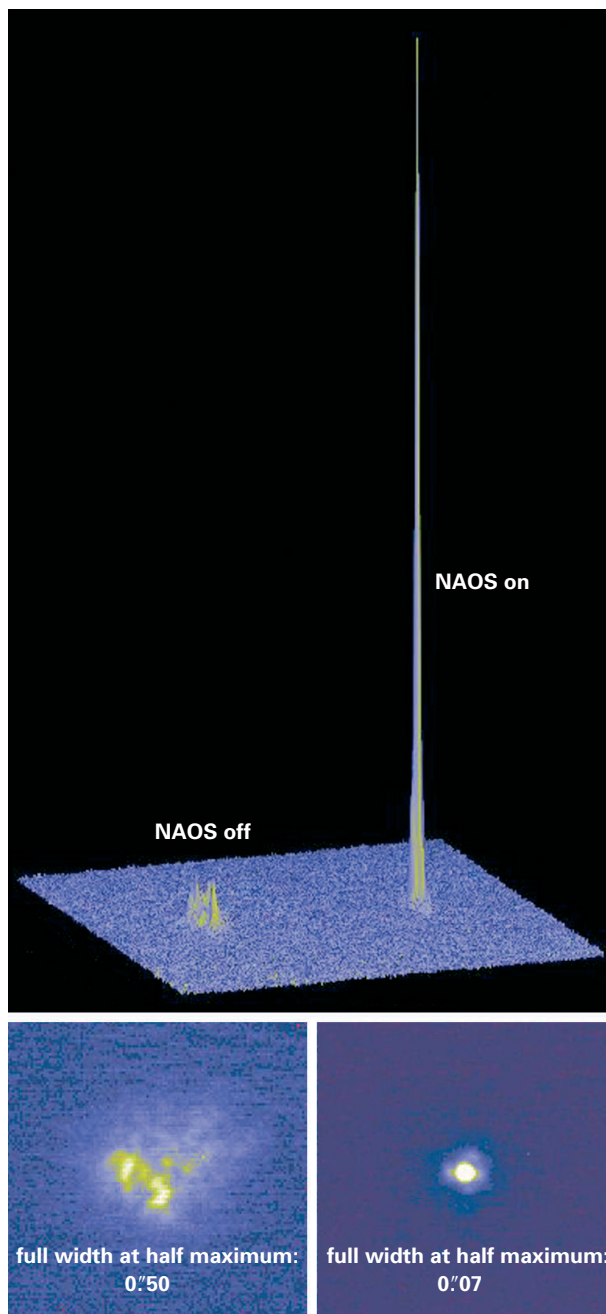
Diese Methode funktioniert jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen. So benötigt NAOS einen Referenzstern mit bestimmter Mindesthelligkeit im Feld. Im Visuellen liegt die Grenzhelligkeit bei 18. Größe, bei $2.2\ \mu\text{m}$ bei 14. Größe. Das Seeing darf etwa 2 Bogensekunden nicht überschreiten, andernfalls arbeitet NAOS nicht mehr optimal. NAOS korrigiert das Feld in einem Umkreis bis zu 60 Bogensekunden vom Referenzstern. Allerdings verschlechtert sich die Qualität der Korrektur mit zunehmendem Abstand vom Referenzstern (Anisoplanatismus). Und die Qualität der Korrektur verschlechtert sich mit abnehmender Helligkeit des Referenzsterns und mit zunehmendem Seeing.

NAOS-CONICA und HUBBLE im Vergleich

Diese Liste der Einschränkungen und notwendigen Voraussetzungen für den Einsatz der adaptiven Optik soll indes keinesfalls den Eindruck erwecken, die Technik ließe sich nur in sehr begrenztem Umfang einsetzen. Schon die ersten Ergebnisse demonstrierten eindrucksvoll, dass NAOS-CONICA dem Weltraumteleskop HUBBLE in vielen Fällen Konkurrenz macht. Grundsätzliche Vorteile liegen auf der Hand: Der Hauptspiegel des VLT besitzt einen 3.4-mal so großen Durchmesser wie das HST. Damit ist auch die Beugungsgrenze bei vorgegebener Wellenlänge am VLT um den selben Faktor kleiner. Die Licht sammelnde Fläche ist beim VLT sogar um das Zehnfache größer. Bei $2.2\ \mu\text{m}$ Wellenlänge erreicht NAOS-CONICA nach einer Stunde Belichtungszeit eine Grenzhelligkeit von etwa 25 mag. Außerdem lassen sich am Boden beispielsweise neu entwickelte Detektoren we-

sentlich schneller und preisgünstiger einsetzen als bei HUBBLE.

Andererseits hat das Weltraumteleskop aber auch sichtliche Vorteile. So ist es nicht auf Felder mit geeignetem Referenzstern angewiesen, und die Auflösung variiert kaum über das gesamte Gesichtsfeld. Außerdem gibt es Wellenlängenbereiche, in denen die Atmosphäre undurchlässig ist, beispielsweise um $1.4\ \mu\text{m}$ und $1.9\ \mu\text{m}$ sowie in weiten Bereichen zwischen $2.5\ \mu\text{m}$ und $3.4\ \mu\text{m}$ sowie zwischen $4.2\ \mu\text{m}$ und $4.7\ \mu\text{m}$. Hier sind Beobachtungen vom Boden aus unmöglich. Und nicht zuletzt besitzt auch der Nachthimmel eine gewisse Helligkeit, gegen die HUBBLE nicht anzukämpfen braucht.



Erste Ergebnisse, zukünftige Aufgaben

Als erstes Testobjekt für NAOS-CONICA visierte das Teleskop einen unbenannten Stern 8. Größe in der Milchstraße an. Das unkorrigierte Bild zeigte ein Seeing von 0.5 Bogensekunden. Unmittelbar nach dem Einschalten von NAOS zog sich das Sternbild zusammen (Abb. II.4). Bei Wellenlängen von $1.2\ \mu\text{m}$ und $2.2\ \mu\text{m}$ erreichte das System auf Anhieb mit Auflösungen von 0.04 bzw. 0.07 Bogensekunden nahezu die theoretische Beugungsgrenze.

Eine Aufnahme des Sternhaufens NGC 3603 zeigt im Vergleich mit einer HUBBLE-Aufnahme das Potenzial der neuen Kamera (Abb. II.5). Eine prächtige Aufnahme gelang auch von Saturn (Abb. II.6). Es ist eine Überlagerung von zwei Aufnahmen bei $1.6\ \mu\text{m}$ und $1.2\ \mu\text{m}$ Wellenlänge mit Belichtungszeiten von 20 bzw. 24 Sekunden. Als Referenzobjekt für die adaptive Optik diente der Mond Tethys (unten sichtbar). Die Auflösung betrug 0.07 Bogensekunden, entsprechend 410 Kilometer am Ort des Planeten. Auch von dem Jupitermond Io erhielten die Astronomen eine hochaufgelöste Aufnahme (Abb. II.7). Sie wurde bei einer Belichtungszeit von 230 Sekunden durch ein schmalbandiges Filter bei $2.166\ \mu\text{m}$ (Bracket-Gamma-Linie) Wellenlänge gewonnen. Obwohl die Mondscheibe nur einen scheinbaren Durchmesser von 1.2 Bogensekunden besaß, erkennt man zahlreiche Oberflächenformationen des vulkanisch aktiven Mondes mit einer Auflösung von 0.068 Bogensekunden, entsprechend 210 Kilometern auf Io.

NAOS-CONICA verbleibt als Instrument an dem Teleskop YEPUN und steht dort Gastbeobachtern zur Verfügung. Den Astronomen der beiden MPIs werden als Lohn für ihren Einsatz 45 Beobachtungsnächte zur Verfügung stehen. Auch die Kollegen aus Frankreich erhalten eine Zahl garantierter Beobachtungsnächte. Das neue Instrument lässt sich für eine Vielzahl von Forschungsbereichen anwenden. Hier eine kleine Auswahl:

- Studium der Entstehung und Entwicklung von Galaxien und Galaxienhaufen, deren Spektren aufgrund der großen Entfernungen stark rotverschoben sind.
- Beobachtung der Zentren aktiver Galaxien, in denen sich Schwarze Löcher befinden, die vermutlich von großen Staubmassen umgeben sind.
- Entdeckung sehr massearmer Sterne und Brauner Zwerge, die vorwiegend im Infraroten leuchten.

Abb. II.4: Unten das erste Bild von NAOS-CONICA. Links das unkorrigierte Bild, rechts nach Einschalten der adaptiven Optik. Oben eine räumliche Darstellung der Intensitätsverteilung dieser beiden Aufnahmen. (ESO)

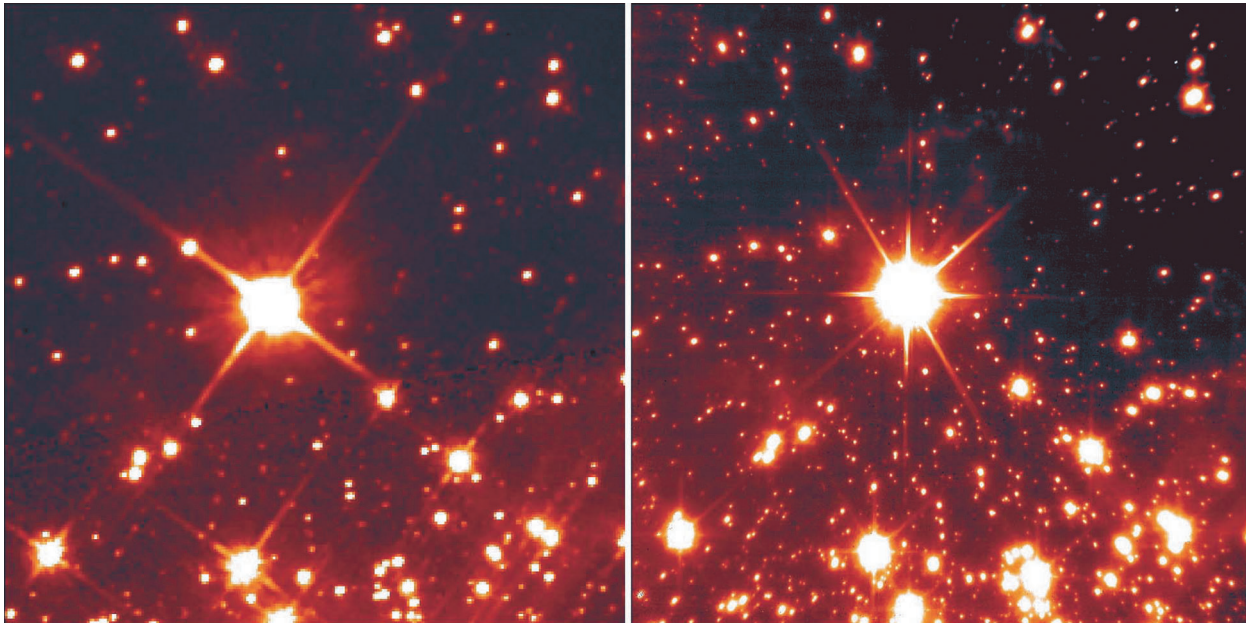


Abb. II.5: Der Sternhaufen NGC 3603, links aufgenommen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE, rechts mit NAOS-CONICA. (NASA/ESO)

- Studium von Sternentstehungsgebieten. Hier sind die jungen Sterne häufig hinter Staubwolken verborgen, die im Infraroten durchlässig werden.
- Studium von zirkumstellaren Staubscheiben, in denen sich möglicherweise Planeten bilden.
- Entdeckung und direkte Beobachtung extrasolarer Planeten. Im Infraroten ist der Helligkeitskontrast zwi-

schen Stern und Planet wesentlich geringer als im sichtbaren Licht.

(Rainer Lenzen, P. Bizenberger, A. Böhm, M. Hartung, W. Laun, N. Münch, R.-R. Rohloff, C. Storz, K. Wagner)



Abb. II.6: Saturn, aufgenommen im nahen Infrarot bei 0.07 Bogensekunden Auflösung (ESO).

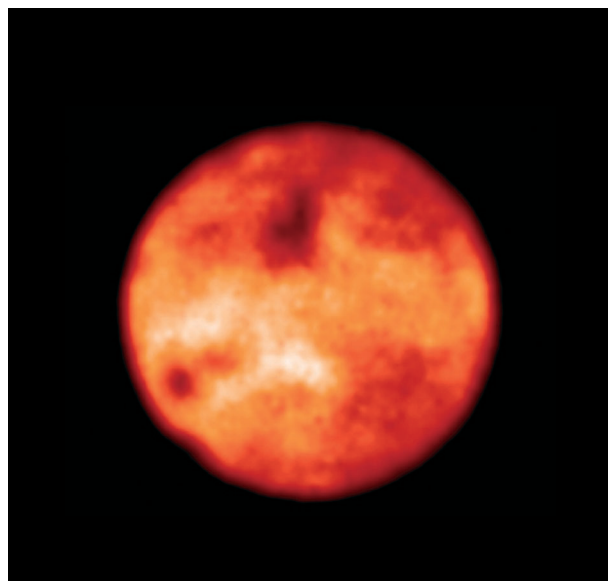


Abb. II.7: Jupitermond Io, aufgenommen bei 2.166 μm Wellenlänge. Die Auflösung beträgt 0.068 Bogensekunden. (ESO)

II.2 Entferntester Quasar durchleuchtet Urmaterie

Im Rahmen der großen Himmelsdurchmusterung Sloan Digital Sky Survey (SDSS), die von amerikanischen, deutschen und japanischen Astronomen durchgeführt wird, wurde der bislang entfernteste Quasar entdeckt. Er strahlte das heute empfangene Licht zu einer Zeit aus, als das Universum nur etwa 700 Millionen Jahre alt war. Astronomen des MPIA nahmen am VLT, dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO), ein Spektrum dieses Himmelskörpers auf. Es bezeugt, dass sich der Quasar noch in der überwiegend neutralen intergalaktischen Materie befindet, die das sehr junge Universum ausfüllte. Damit ist es den Astronomen erstmals gelungen, mit ihren Beobachtungen an die Grenze zur „unverfälschten“ Urmaterie vorzustoßen.

Nach dem Urknall war das Universum mit einem heißen, ionisierten Gas angefüllt, in dem sich Protonen und Elektronen frei bewegten. Erst nach etwa 300 000 Jahren war das Medium so weit abgekühlt, dass sich Atome bilden konnten. Dies geschah bei einer Rotverschiebung von $z = 1100$ bis 1500 , wobei der Wert vom kosmologischen Weltmodell abhängt. Nach dieser Rekombinationsphase war das Gas im gesamten Universum neutral. In diesem fast ausschließlich aus Wasserstoff und Helium bestehenden Medium bildeten sich die ersten Sterne, Galaxien und Quasare. Sie ionisierten mit ihrer UV-Strahlung ihre Umgebung von neuem. Diese so genannte Re-Ionisation kennzeichnet die Phase der allerersten Strukturbildung im jungen Universum, die es wieder hell werden ließ.

Die Re-Ionisationsphase

Wann die Re-Ionisationsphase eintrat und wie sie ablief, ist eine der grundlegenden Fragen der heutigen Kosmologie, die sich bislang nur theoretisch angehen ließ. Nach heutigen Modellen setzte die Re-Ionisation bei Rotverschiebungen zwischen $z = 6$ und $z = 20$ ein, also einige Hundert Millionen Jahre nach dem Urknall. Dieser Wert ist jedoch unsicher, weil die Re-Ionisation ein sehr komplexer Vorgang war. Computersimulationen müssen beispielsweise Gasdynamik, Sternentstehungsprozesse, atomare und molekulare Vorgänge und Strahlungstransportphänomene berücksichtigen. Weiterhin ist es nicht klar, ob UV-Strahlung von heißen Sternen oder von Materie aufammelnden (akkretierenden) Schwarzen Löchern den dominanten Beitrag zur Re-Ionisation leistete.

Ein Unsicherheitsfaktor hierbei ist zum Beispiel die Massenfunktion der Sterne. Sehr wahrscheinlich hatte sie damals eine andere Form als heute, weil das damalige Gas keine schweren Elemente enthielt. Einiges spricht da-

für, dass in der ersten Sternengeneration der Anteil massereicher Sterne größer war als heute. Infolgedessen waren Supernovaexplosionen häufiger – mit entscheidenden Auswirkungen sowohl auf die Anreicherung des umgebenden Mediums mit schweren Elementen als auch auf die Zahl energiereicher, ionisierender UV-Photonen. Komplex wird die zeitliche Entwicklung der Re-Ionisationsphase zudem durch Inhomogenitäten im Gas, das sich lokal zu dichteren Wolken zusammenzog, oder der Dunklen Materie, deren Natur nach wie vor unbekannt ist. Sie wirkte gewissermaßen als „Kondensationskeim“ für die entstehenden Galaxien.

Nach der heutigen Vorstellung lässt sich die Re-Ionisationsphase vermutlich grob in drei Phasen unterteilen: Zunächst bildeten sich um die Sterne oder Quasare herum einzelne Gebiete ionisierten Gases (HII-Regionen). In der zweiten Phase überlappten sich diese Regionen, wodurch die Intensität der UV-Strahlung stark anstieg. In der dritten Phase wurde schließlich auch der in dichten Gebieten noch verbliebene neutrale Wasserstoff ionisiert. In solchen Modellen setzt die zweite Phase bei einer Rotverschiebung um $z = 7$ und die dritte bei $z = 6$ ein.

Beobachtung der entferntesten Quasare

Letztendliche Klarheit über diese früheste Phase der Strukturbildung im Universum können nur die Beobachtungen bringen. Himmelskörper bei Rotverschiebungen oberhalb von $z = 6$ zu entdecken und spektroskopisch studieren zu können, ist jedoch erst seit Kurzem möglich. Der Sloan Digital Sky Survey (SDSS, siehe unten) bietet die Möglichkeit, die sprichwörtlichen Nadeln im Heuhaufen aufzuspüren, und die neue Generation der Großteleskope verfügt über die erforderliche Leistungsfähigkeit, sie detailliert zu studieren.

Mit dem SDSS ist es unter anderem möglich, Quasare aufgrund ihrer charakteristischen Strahlungsverteilung zu entdecken. Quasare sind sehr kompakte Zentralgebiete von Galaxien, in denen sich ein massereiches Schwarzes Loch befindet. Dieses ist von einer Scheibe aus heißem Gas umgeben, das zum Beispiel im UV-Bereich intensiv strahlt. Da Quasare die leuchtkräftigsten bekannten Himmelskörper sind, sollten sie noch bei Rotverschiebungen $z > 6$ beobachtbar sein.

Im Berichtsjahr wurden in den Daten des SDSS zwei neue Entfernungsrekordhalter unter den Quasaren entdeckt. Anschließend Beobachtungen mit dem Keck-Teleskop bestimmten ihre Rotverschiebung zu $z = 6.28$ und $z = 5.99$. Den entferntesten Quasar, der die Bezeichnung SDSS 1030+0524 erhielt, sehen wir damit zu einer Zeit,

als das Alter des Universums nur etwa 5 % seines heutigen Wertes betrug, also etwa 700 Millionen Jahre ($q_0 = 0.5$, $H_0 = 65 \text{ km/(s Mpc)}$).

Astronomen des MPIA beobachteten zum gleichen Zeitpunkt den Rekordhalter SDSS 1030+0524 im nahen Infrarot mit der Kamera ISAAC am VLT (Abb. II.8) und erhielten zudem ebenfalls am VLT von beiden Quasaren Spektren mit ISAAC und FORS 2 (Abb. II.9).

Das Spektrum von SDSS 1030+0524 zeigt einen dramatischen Effekt: Bei der Wellenlänge $\lambda = 885 \text{ Nanometer}$ liegt die vom Quasar selbst emittierte, auf dem Weg zu uns aus dem Ultraviolett ins nahe Infrarot verschobene

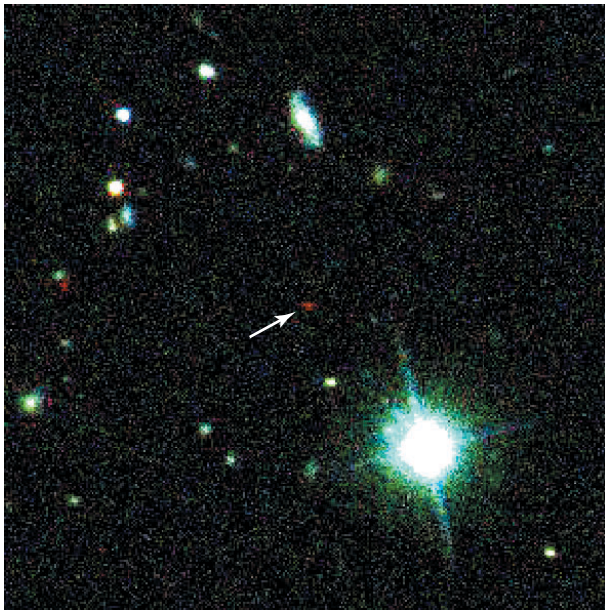


Abb. II.8: Der entfernteste Quasar (Pfeil) erscheint auf der Entdeckungsaufnahme als ein schwach leuchtendes, auffallend rotes Objekt. (SDSS)

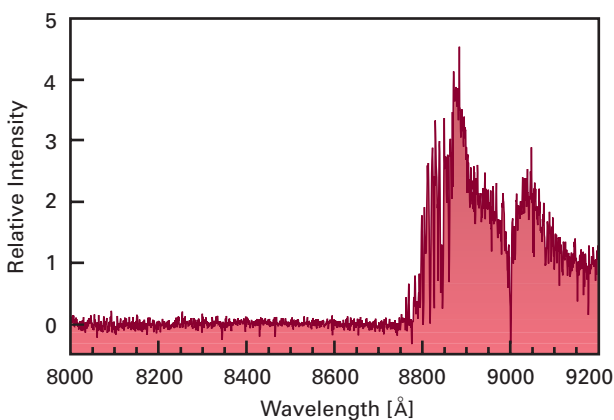


Abb. II.9: Das Spektrum des neuen Entfernungsrekordhalters SDSS 1030+0524. Im Bereich zwischen $\lambda = 845 \text{ nm}$ und $\lambda = 871 \text{ nm}$ ist das Kontinuum nicht mehr nachweisbar.

Lyman- α -Emissionslinie. Normalerweise schließt sich daran zu kürzeren Wellenlängen hin Kontinuumsstrahlung an. Im vorliegenden Spektrum ist dieses „Lyman-Kontinuum“ zwischen $\lambda = 845 \text{ nm}$ und $\lambda = 871 \text{ nm}$ jedoch nicht mehr nachweisbar. Es ist auf höchstens 0.5 % des ursprünglichen Wertes reduziert. Bei dem anderen Quasar mit $z = 5.99$ ist der Fluss nur auf 7 %, bei einem dritten, ebenfalls mit dem SDSS entdeckten Quasar mit $z = 5.8$, nur auf 9 % herabgesetzt.

Dieses Verschwinden des Lyman-Kontinuums entsteht dadurch, dass das neutrale intergalaktische Gas, das sich in einem Rotverschiebungsbereich zwischen etwa $z = 6.0$ und $z = 6.3$ befindet, die Strahlung absorbiert. Die neuen Beobachtungen zeigen also, dass die Re-Ionisation zu der Zeit, in der wir den Quasar bei $z = 6.28$ sehen, noch nicht abgeschlossen war.

Bei den Quasaren mit kleineren Rotverschiebungen steigt die Kontinuumsmission langsam an. Die Ursache hierfür ist die nach und nach einsetzende Re-Ionisation durch Sterne und Quasare mit wachsendem Alter des Universums.

Aus den Beobachtungsdaten des entferntesten Quasars und einiger weiterer Quasare lassen sich bereits erste, vorsichtige Schlüsse über die Bedingungen in der Re-Ionisationsära ziehen. Zunächst einmal zeigt das Spektrum von SDSS 1030+0524, dass die Absorption der Strahlung auf der „blauen“ Seite der Lyman- α -Emission nicht wirklich vollständig ist. Das rührt daher, dass der Quasar das Gas in seiner Umgebung hochgradig ionisiert und dadurch Absorption durch neutrales Gas verhindert. Man nennt dies Proximity-Effekt. Materie, die unmittelbar vor dem Quasar liegt, ist weniger rotverschoben, absorbiert also bei kürzeren Wellenlängen. Aus dem Spektrum lässt sich der Radius der ionisierten Umgebung zu etwa 15 Millionen Lichtjahre abschätzen. Nimmt man an, dass das gesamte Gas neutral war, bevor der Quasar zu leuchten begann, so ergibt sich die Leuchtdauer des Quasars aus der Zeit, die sein Licht brauchte, um diesen Raum zu durchdringen, also 15 Millionen Jahre.

Aus den vorhandenen spektroskopischen Daten der bislang bekannten entferntesten Quasare lässt sich der Unterdrückungsgrad des Lyman-Kontinuums in Abhängigkeit von der Rotverschiebung ermitteln. Das in Abb. II.10 gezeigte Ergebnis entspricht dabei qualitativ vollkommen den Erwartungen. Die Absorption der Lyman- α -Strahlung der Quasare nimmt mit wachsender Rotverschiebung zu (Abb. II.10, oben). Oberhalb von $z = 6$ wird das Medium praktisch undurchsichtig, das heißt es ist neutral. Der untere Teil von Abb. II.10 zeigt die entsprechende optische Tiefe mit wachsender Rotverschiebung.

Diese neuen Beobachtungen haben bewiesen, dass sehr weit entfernte Quasare sich als „Sonden“ für das unveränderte, primordiale Medium nutzen lassen. Dabei hat sich gezeigt, wie rasch nach dem Urknall sich die ersten Quasare gebildet haben. Im Zentrum dieser Objekte befinden sich Schwarze Löcher mit typischerweise einigen

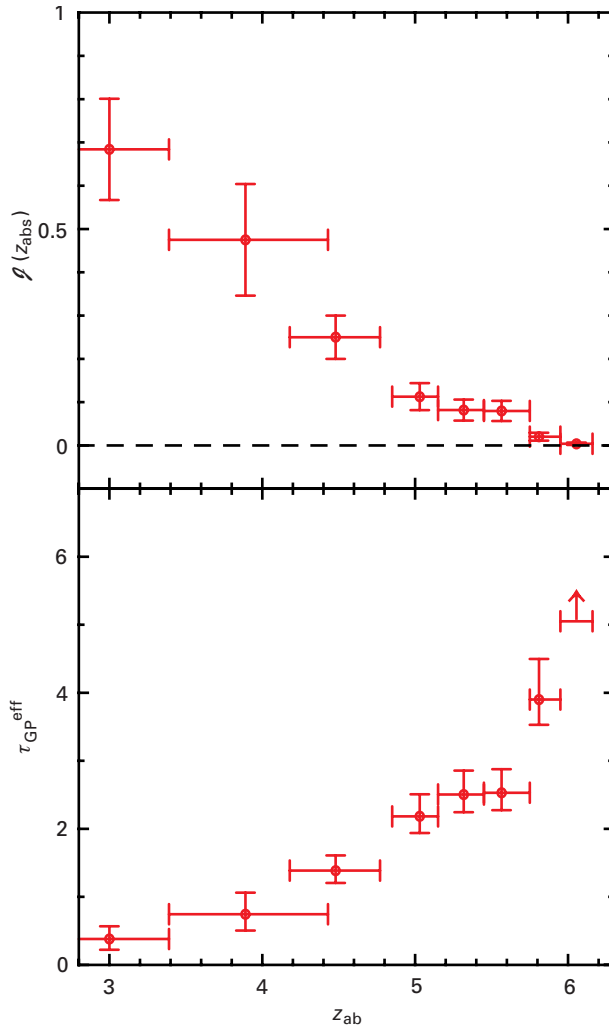


Abb. II.10: Entwicklung der Lyman- α -Emission in Abhängigkeit von der Rotverschiebung z . **Oben:** das Verhältnis der beobachteten zur theoretisch möglichen, nicht absorbierten Lyman- α -Strahlung. **Unten:** die optische Tiefe der Lyman- α -Photonen. (Fan et al.)

hundert Millionen Sonnenmassen. Auf welche Weise diese entstanden sind, ist noch weitgehend ungeklärt.

„Klassisch“ entsteht ein Schwarzes Loch, wenn ein massereicher Stern am Ende seiner Entwicklung explodiert. Dann sprengt er die äußere Hülle ab, während der zentrale Kern zum Schwarzen Loch zusammenbricht. Ein solches stellares Schwarzes Loch besitzt jedoch nur etwa zehn Sonnenmassen. Um zu einem Quasarkern heranzuwachsen, muss es sehr viel Materie aus der Umgebung aufsammeln. Es wäre demnach sehr interessant, wenn man auch bei den Quasaren selbst eine Entwicklung in Abhängigkeit von der Rotverschiebung finden würde.

Bislang basiert die Analyse auf den Daten von wenigen Quasaren. Die Astronomen schätzen aber, dass sie im Rahmen des SDSS rund 20 weitere Quasare mit Rotverschiebungen zwischen $z = 6.0$ und $z = 6.6$ entdecken werden. Mit ihnen wird sich das intergalaktische Medium in

der Rekombinationsphase des jungen Universums detaillierter studieren lassen. Dabei werden sich sowohl zeitliche Entwicklungen als auch die vermuteten räumlichen Inhomogenitäten untersuchen lassen

Bei noch weiter entfernten Quasaren stößt der SDSS jedoch an seine Grenzen. Bei Rotverschiebungen jenseits von $z > 6.6$ ist die Lyman-Emission bis ins nahe Infrarot verschoben, wo dieser Survey nicht mehr empfindlich ist. Hier könnten Infrarot-Surveys, wie die geplante Mission PRIME, zum Ziel führen. An deren Vorbereitung ist das MPIA ebenfalls beteiligt (s. Kapitel III).

Der Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

Der im April 2000 in Angriff genommene Sloan Digital Sky Survey (SDSS) ist die bislang umfangreichste digitale Himmelsdurchmusterung. Hierfür wurde auf dem Apache Point in New Mexico eigens ein mit einer Mosaik-CCD-Kamera ausgerüstetes 2,5-Meter-Teleskop gebaut. 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. Mit dieser Durchmusterung soll der halbe Nordhimmel in zahlreichen Farbbändern aufgenommen werden, besonders interessante und auffällige Objekte werden ständig spektroskopiert.

Der endgültige Katalog aller erfassten Objekte wird Positionen und Farben von mehr als hundert Millionen Himmelskörper enthalten. Anhand ihrer Farben werden sich bereits viele auffallende Objekte identifizieren lassen. Insgesamt sollen Rotverschiebungen von etwa einer Million Galaxien und 100 000 Quasaren gemessen werden. Bislang wurden bereits über 13 000 aufgespürt, darunter 26 der 30 entferntesten Quasare und die beschriebenen Rekordhalter.

Die Daten des SDSS werden es ermöglichen, die räumliche Verteilung der Galaxien und Quasare in einem hundertfach größeren Volumen zu bestimmen als bisher. Es werden sich daraus weitreichende Schlüsse über die frühe Entwicklung von Galaxien und Quasare sowie auch über den Aufbau unseres Milchstraßensystems ergeben.

(Laura Pentericci, Hans-Walter Rix)

II.3 COMBO-17 enthüllt Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Der größte Teil der insgesamt im Universum vorhandenen Materie ist unsichtbar. Bislang sind weder die Natur noch die räumliche Verteilung dieser Dunklen Materie bekannt. Astronomen des MPIA haben in Zusammenarbeit mit Kollegen aus Großbritannien die räumliche Verteilung der Dunklen Materie in Supergalaxienhaufen kartiert. Sie nutzten hierfür die am 2.2-Meter-Teleskop auf La Silla, Chile, installierte Weitfeldkamera, die von Astronomen des Instituts gemeinsam mit Kollegen der Europäischen Südsternwarte, Eso, gebaut worden war.

Für viele astronomische Studien werden lichtstarke Instrumente mit großem Bildfeld immer bedeutender. Gegenwärtig laufen weltweit mehrere Himmelsdurchmusterungen mit dem Ziel, die Entwicklung der Galaxien über einen möglichst großen Rotverschiebungsbereich, d.h. bis in möglichst große Entfernungen zu entschlüsseln. Forscher des MPIA haben ein solches Projekt initiiert und gemeinsam mit Kollegen der Universität Bonn und des Institute for Astronomy in Edinburgh realisiert. Der Name der Durchmusterung, COMBO-17 (Classifying Objects by Medium-Band Observations with 17 Filters), weist darauf hin, dass mit Hilfe von Aufnahmen durch 17 Filter die Helligkeiten von Galaxien in entsprechend vielen Farbbereichen gemessen werden.

Diese Beobachtungen dienen nicht ausschließlich den Fragen der Galaxienentwicklung, sondern lassen sich darüber hinaus auch auf andere Problemstellungen anwenden, zum Beispiel auf die Verteilung der Dunklen Materie in Galaxienhaufen.

Die Strategie von COMBO-17

Entscheidende Voraussetzung für das Projekt ist das große Bildfeld der Weitfeldkamera (Wide Field Imager, WFI, s. Jahresbericht 1998, S. 33), die seit Ende 1998 am 2.2-Meter-MPG/ESO-Teleskop auf La Silla arbeitet. Sie besitzt ein 32×33 Quadratbogenminuten großes Bildfeld, etwas größer als das Bild des Vollmonds. Das CCD-Array, bestehend aus acht Einzelchips mit jeweils 2046×4096 Pixel, ist über einen sehr weiten Spektralbereich vom UV ($\lambda = 350$ nm) bis zum nahen Infrarot ($\lambda = 950$ nm) empfindlich.

Im Rahmen von COMBO-17 werden insgesamt fünf weit voneinander entfernte Himmelsfelder durch 17 Filter aufgenommen. Dies sind fünf Breitbandfilter (Standardbereiche U, B, V, R, I) und 12 Mittelbandfilter (relative Breite ca. 3 %). Eine ausgeklügelte Software ermöglicht es, auf den Aufnahmen zunächst die punktförmig erscheinenden Sterne und Quasare von den ausgedehnten Galaxien zu trennen. Aufgrund der unterschiedlichen Farbhel-

ligkeiten lassen sich dann die verbliebenen Objekte sehr fein unterteilen. Für Sterne lassen sich die Spektraltypen A bis M8 identifizieren, für Galaxien die Klassen E (elliptisch) bis Sc (Spiralgalaxie mit hoher Sternentstehungsrate) sowie die Starburstgalaxien mit ungewöhnlich hoher Sternentstehungsrate. Außerdem lässt sich jeder Galaxie bis zu einer Helligkeit von 24 mag im Roten eine Rotverschiebung zuordnen, deren Unsicherheit je nach Helligkeit und Typ zwischen $\Delta z = 0.005$ und $\Delta z = 0.1$ variieren kann. Auch Quasare werden identifiziert und ihre Rotverschiebung bis auf besser als $\Delta z = 0.1$ ermittelt.

Am Ende der Durchmusterung COMBO-17 soll ein Himmelsfeld von mindestens einem Quadratgrad vollständig nach Sternen, Galaxien und Quasaren abgesucht sein. Zum Vergleich: Die HUBBLE Deep Fields, die beiden tiefen Aufnahmen am Nord- und Südhimmel mit dem Weltraumteleskop HUBBLE, überdecken nur ein Hundertstel des Gesichtsfeldes des WFI. COMBO-17 wird also vergleichsweise sicherere Aussagen über die Entwicklung von Galaxien machen können, weil hier ein wesentlich größerer und damit repräsentativerer Raumbereich erfasst wird. Insgesamt wird COMBO-17 für 50 000 Galaxien heller als 24. Größe die Rotverschiebung und die spektrale Energieverteilung bestimmen.

Der schwache Gravitationslinseneffekt im Superhaufen Abell 901/902

Während die Datenanalyse zur Galaxienentwicklung derzeit noch läuft, konnten die Astronomen vorab bereits einige Aufnahmen nutzen, um mit ihnen das Feld um den Superhaufen Abell 901/902 zu studieren (Abb. II.11). Dieses Gebiet hatten die Astronomen nicht zufällig für COMBO-17 ausgewählt, sondern weil sich hier mindestens drei reiche Galaxienhaufen mit nahezu gleicher Rotverschiebung befinden. Hier wollen sie ganz gezielt untersuchen, inwieweit Galaxien- und Massenverteilung im Universum übereinstimmen. Es besteht nämlich schon seit längerem der Verdacht, dass die Verteilung der Dunklen Materie nicht genau der Verteilung der sichtbaren Materie in Form von Sternen und Galaxien entspricht. Erste Untersuchungen zu dieser Frage ergaben jedoch unsichere und eher widersprüchliche Ergebnisse.



Abb. II.11: Das etwa vollmondgroße Feld mit den Galaxienhaufen Abell 901 und 902, aufgenommen mit dem WFI. Komposit aus drei Bildern, aufgenommen durch ein Blau-, ein Visuell- und ein Rotfilter.

Der Supergalaxienhaufen Abell 901/902 eignet sich ausgezeichnet für COMBO-17. Mit einem Durchmesser von etwa 30 Bogenminuten passt er perfekt in das Bildfeld des WFI. Bei einer Rotverschiebung von $z = 0.16$ entspricht dieses Feld am Ort des Haufens einem Durchmesser von ca. 17 Millionen Lichtjahren. Das Feld wurde durch die Mittelbandfilter jeweils 80 bis 300 Minuten lang belichtet, wobei sich die Gesamtaufnahmen aus der Summe von jeweils 10 bis 20 kürzeren Aufnahmen ergaben. Zusätzlich zu den Vielfarben-Aufnahmen wurde das Feld im roten Spektralbereich bei ausgewähltem gutem Seeing von besser als 0.7 Bogensekunden mit einer Gesamtbelichtungszeit von 6.5 Stunden extrem tief aufgenommen. Hier wird für Punktquellen eine Grenzhelligkeit von

26 mag erreicht. Diese Aufnahme (Abb. II.12b) ist ideal dafür geeignet, Galaxien bis zu einer Rotverschiebung von etwa $z = 0.3$ noch als ausgedehnte Objekte zu identifizieren und zu klassifizieren.

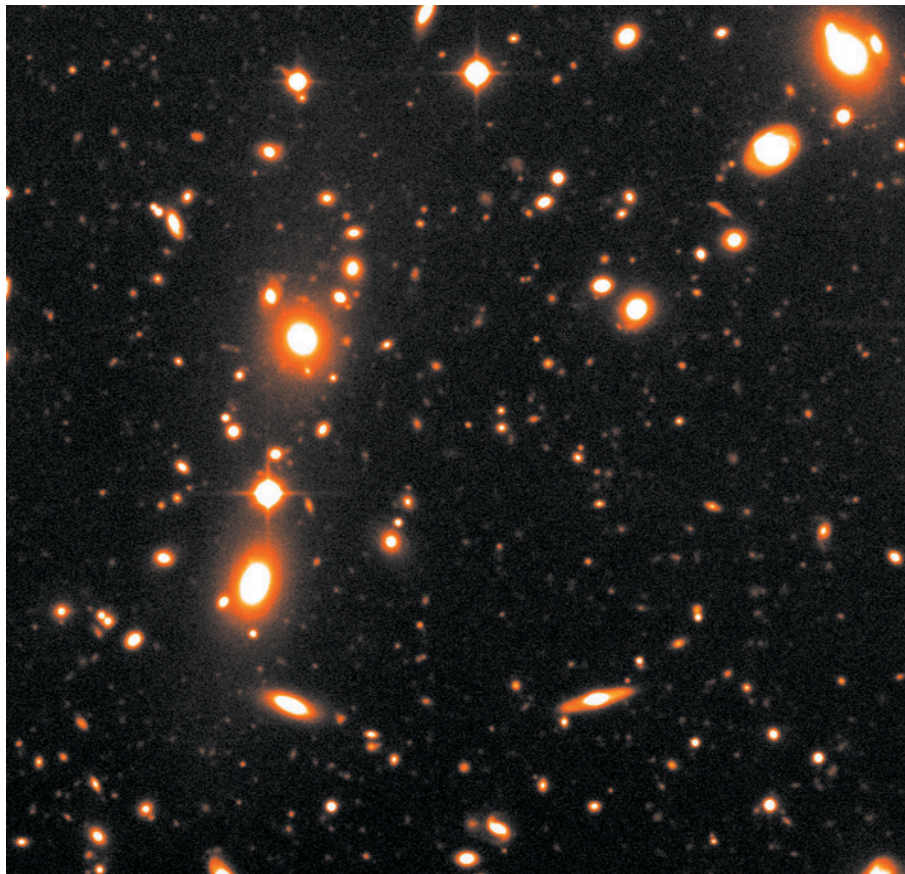
Für die Kartierung der Dunklen Materie ist diese extrem scharfe Aufnahme notwendige Voraussetzung. Das Verfahren funktioniert nämlich nach folgendem Prinzip. Das Schwerkraftfeld jeder Art von Materie krümmt den Raum. Läuft das Licht einer fernen Galaxie beispielsweise durch das Gravitationsfeld eines Galaxienhaufens, so wird es ähnlich wie beim Durchgang durch eine Glaslinse abgelenkt. Von der Erde aus beobachtet, hat dieser Linseneffekt unterschiedliche Auswirkungen: Die beobachtete Position der Galaxie ist gegenüber der wahren Position verschoben, die Helligkeit des Galaxienbildes wird verstärkt und dessen Form verzerrt.

Bei dem so genannten schwachen Gravitationslinseneffekt nutzt man die letzt genannte Verzerrung aus: Normalerweise erscheinen die Spiralgalaxien am Himmel –



Abb. II.12: Der Zentralbereich des Galaxienhaufens Abell 902;
a) Ausschnitt aus Abb. II.11, und **b)** die hochauflösende Rotauf-

nahme desselben Feldes bei einem Seeing von lediglich 0.7 Bogen-
sekunden.



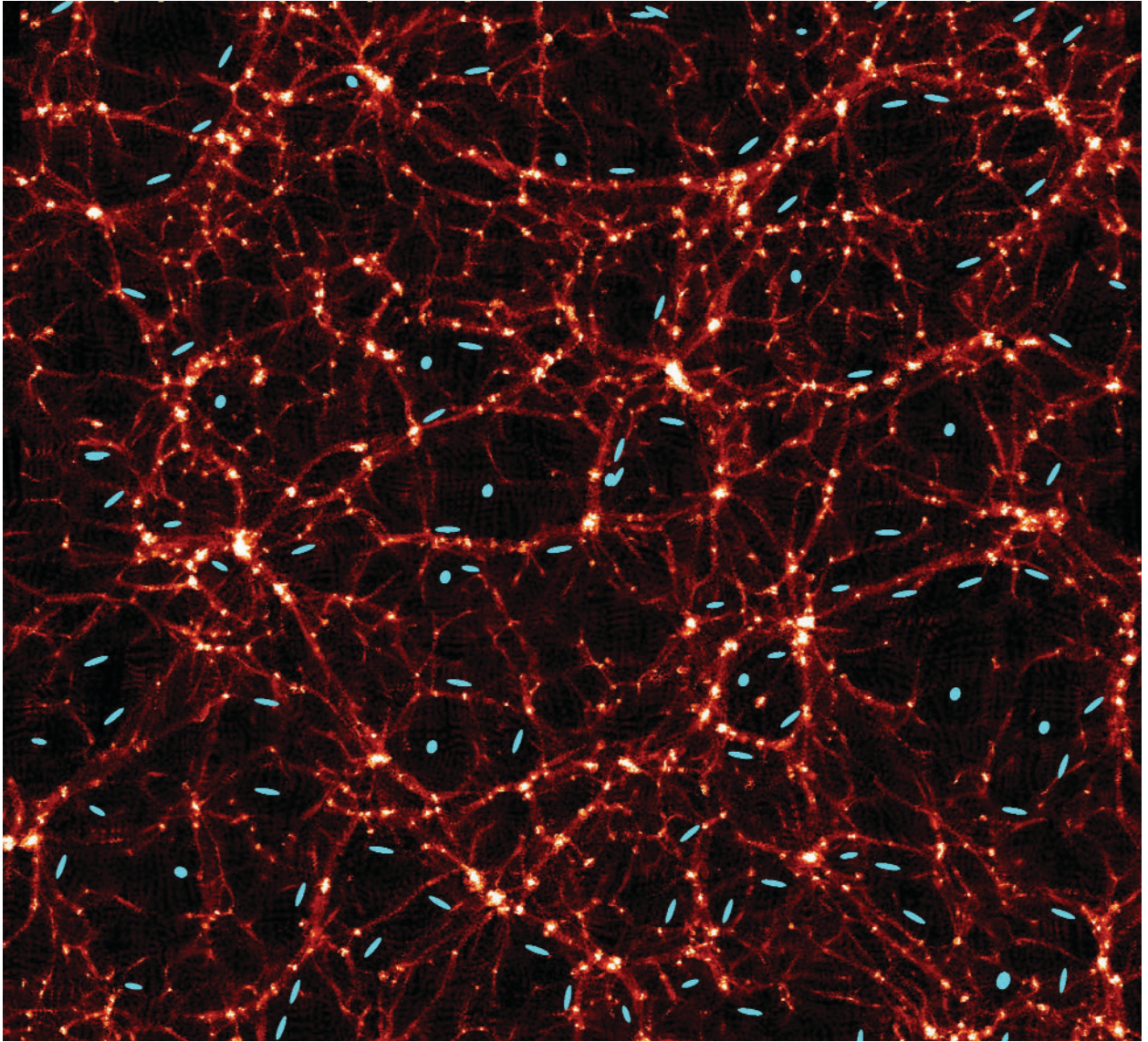


Abb. II.13: Schema des schwachen Gravitationslinseneffekts. Die Computersimulation zeigt ein verzweigtes Netz von Galaxienhaufen. Deren Schwerkraft bewirkt, dass sich Galaxienbilder (blau) tangential zu den Haufenzentren ausrichten. (MPA)

von der Seite gesehen – als längliche Bilder, deren Symmetrieachsen keine bevorzugte Ausrichtung aufweisen, oder – von oben gesehen – als kreisförmige Scheiben. Wirkt aber ein im Vordergrund befindlicher Galaxienhaufen als Gravitationslinse, so werden die Bilder der Galaxien im Hintergrund des Haufens tangential zu den Schwerkraftzentren geringfügig gedehnt.

Aus einer nicht zufälligen Orientierung der Galaxienbilder lässt sich mit Hilfe raffinierter mathematischer Verfahren direkt auf die räumliche Verteilung und die Menge der Materie in dem als Gravitationslinse wirkenden Galaxienhaufen schließen (Abb. II.13 und II.14). Problematisch ist bei dieser Methode jedoch der äußerst geringe Effekt: Die Elongation beträgt im Mittel nur einige Zehntel

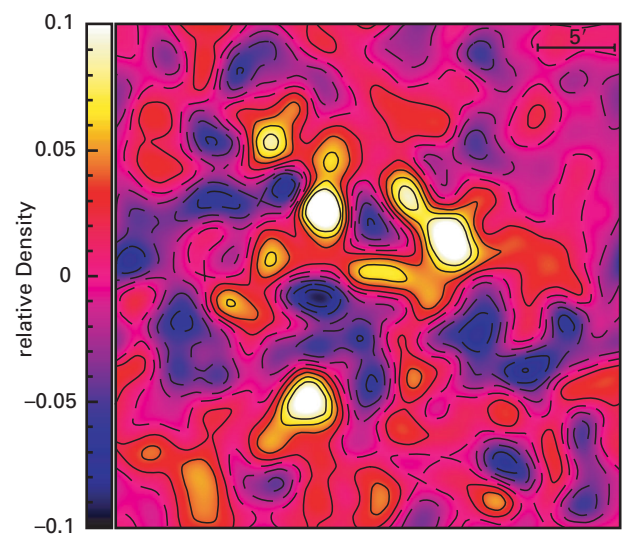


Abb. II.14: Die Rekonstruktion der Gesamtmasse in dem beobachteten Feld. Neben den drei Galaxienhaufen deutet sich eine Materieverbindung zwischen Abell 901a und 901b an.

Bogensekunde. Solche winzigen Verzerrungen sind an einzelnen Galaxien nicht nachweisbar, sondern lassen sich nur an einer großen Zahl von Galaxien als genereller statistischer Trend nachweisen.

Für die einfachste Untersuchung der Galaxienverzerrung genügten zwei Aufnahmen: die hoch aufgelöste Rotaufnahme für die Analyse der Strukturverzerrung und die Blauaufnahme, um Galaxienpopulationen voneinander zu trennen, die vor bzw. hinter den Abell-Haufen liegen.

Das Endziel von COMBO-17 wird es sein, nicht nur diese einfache und schon bei anderen Haufen erfolgreiche Methode anzuwenden, sondern zusätzlich das genaue Wissen über die Entfernung (Rotverschiebung) der Hintergrundgalaxien auszunutzen. Auf diese Weise kann die Masse der Haufen direkt und ohne zusätzliche Annahmen bestimmt werden.

Dunkle Materie in den Abell-Haufen

Schon frühere Untersuchungen hatten gezeigt, dass der Superhaufen Abell 901/902 aus den drei Unterhaufen Abell 901a, 901b und 902 besteht, die sehr unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Abell 901a scheint ein ungestörter, relaxierter Haufen zu sein, in dessen Zentrum eine massereiche elliptische Galaxie sitzt. Auch im Zentrum von Abell 901b befindet sich eine elliptische Gala-

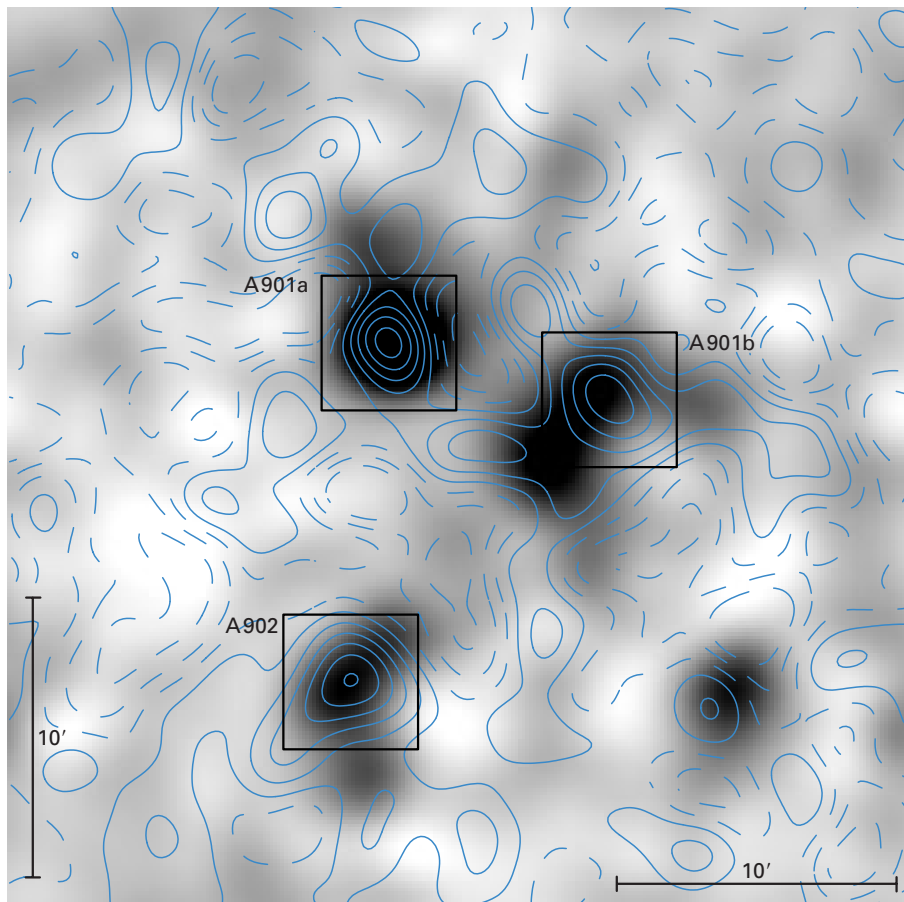
xie, aber der Haufen wirkt insgesamt irregulärer. Die unregelmäßigste Form besitzt Abell 902, wenngleich auch hier zwei elliptische Galaxien den optischen Mittelpunkt definieren.

Insgesamt gingen in die morphologische Analyse rund 40 000 Galaxienbilder ein. Nimmt man vereinfacht an, dass sich alle Hintergrundgalaxien in einer festen Entfernung von etwa $z = 1$ befinden, und dass sich die Galaxienhaufen als sphärische Massenverteilungen konstanter Temperatur beschreiben lassen, so kann man die Gesamtmasse berechnen. Sie ergibt sich bei den drei Haufen zu jeweils etwa 10^{14} Sonnenmassen.

Die Stärke der neuen Methode des schwachen Gravitationslinseneffekts besteht jedoch vor allem darin, dass sich mit ihr die Verteilung der Dunklen Materie ermitteln lässt. Die mit den vorhandenen Daten erstellte Karte zeigt im Vergleich mit der Helligkeitsverteilung der Galaxien (entsprechend der Verteilung der sichtbaren Materie) eine Reihe interessanter Details. (Abb. II.15)

Zunächst einmal ergibt sich der Eindruck, dass die Galaxien speziell in Abell 901a und Abell 902 im Rahmen der erreichten räumlichen Auflösung verhältnismäßig gut der Verteilung der Gesamtmaterie folgen. Abell 901a ist

Abb. II.15: Vergleich der Helligkeitsverteilung der Galaxien mit der Verteilung der Dunklen Materie (Konturlinien). (Gray et al.)



wie erwähnt der symmetrischste von allen drei Galaxienhaufen.

Ein anderes Bild dagegen zeigt Abell 901b. Hier scheint die Dunkle Materie in westlicher Richtung gegen das optische Zentrum verschoben zu sein. Zudem deutet sich zwischen Abell 901a und dem Nachbarhaufen Abell 901b eine Verbindung aus Dunkler Materie an. Auch auf den optischen Aufnahmen gibt es an dieser Stelle Anzeichen für eine schwach ausgeprägte Materiebrücke. Auffällig ist zudem, dass die gravitativ wirksame Dunkle Materie in Abell 901b regelmäßiger und symmetrischer verteilt ist, während die Galaxien sich in einem länglichen Bereich aufhalten.

Diese Befunde deuten an, dass die Dunkle Materie zumindest nicht immer der Verteilung der Galaxien folgt. Dieses Verhalten spiegelt sich auch in den Werten des so genannten Masse/Leuchtkraft-Verhältnisses wider. Dieser für die Kosmologie sehr bedeutsame Parameter ergibt sich auf folgende Weise: Aus der scheinbaren Helligkeit einer Galaxie und ihrer Entfernung errechnet sich die Gesamtleuchtkraft L ihrer leuchtenden Materie (Sternen und Gas), gemessen in Einheiten der Leuchtkraft der Sonne. Diesen Wert kann man nun zu der Gesamtmasse M (gemessen in Einheiten der Sonnenmasse), wie sie sich allein durch die Schwerkraft bemerkbar macht ins Verhältnis setzen.

Auf diese Weise findet man für elliptische Galaxien typischerweise $M/L = 10$. Die in dieser Arbeit ermittelten M/L -Werte weisen sowohl zwischen den drei Galaxienhaufen als auch innerhalb eines jeweiligen Haufens eine ganz erhebliche Streuung zwischen $M/L = 100$ und $M/L = 800$ auf (Abb. II.16). Erst bei Integration über den gesamten Haufen (bei einem Radius von 6 Bogenminuten) konvergieren die Werte bei $M/L = 200$. Somit gibt es, gemittelt über den gesamten Haufen, einige zehnmal mehr Dunkle als leuchtende Materie. Die Streuung der Messda-

ten ist ein weiteres Anzeichen dafür, dass die Dichte der Dunklen Materie nicht proportional zur Dichte der leuchtenden Materie anwächst. Die Konvergenz der Werte bei $M/L = 200$ bei großen Radien deutet zudem darauf hin, dass die Dunkle Materie sich nicht wesentlich über die Verteilung der Galaxien hinaus erstreckt.

Das Verhältnis M/L ist in der Kosmologie an unterschiedlichen Stellen bedeutsam. Einerseits wird vermutet, dass es in Supergalaxienhaufen dem Mittelwert für das gesamte Universum entspricht. Damit hat man eine Möglichkeit, die mittlere Materiedichte im Universum zu ermitteln. Sie ist eine der zentralen Größen für die Entwicklung des Universums.

Von besonderer Bedeutung ist M/L aber auch für alle Theorien zur Entstehung der Galaxien. Die heutzutage meist bevorzugte Theorie der Galaxienbildung geht davon aus, dass sich das Wasserstoffgas vorwiegend nahe der stärksten Verdichtungen der Dunklen Materie ansammelte und dort zu überdurchschnittlich häufiger Galaxienbildung führte. Dementsprechend würde man erwarten, dass das Verhältnis M/L in den Außenbereichen einer starken Massenkonzentration – wie sie offenbar in Abell 901/902 vorliegt – zunimmt. Die hier vorgestellten Beobachtungen stellen dieses Konzept deutlich in Frage.

Allerdings darf nicht übersehen werden, dass die gezeigte Analyse – genau wie ihre Vorläufer – von der stark vereinfachenden Annahme ausgeht, dass sich die Gravitationslinse (der Superhaufen) durch eine relativ dünne Materieverteilung bei der Rotverschiebung $z = 0.167$ beschreiben lässt, während alle Hintergrundgalaxien bei $z = 1$ angenommen werden. Dies ist sicherlich unrealistisch. Tatsächlich konnte mit COMBO-17 hinter Abell 901/902 ein weiterer reicher Galaxienhaufen bei $z = 0.43$ nachgewiesen werden. Darüber hinaus scheint sich auch bei noch größeren Rotverschiebungen um $z = 1$ eine erhöhte Galaxienkonzentration zu befinden. Das bedeutet, dass man den Gravitationslinseneffekt genau genommen als Überlagerung von mindestens drei hintereinander befindlichen Linsen behandeln muss.

Da die Vielfarbenmethode von COMBO-17 für alle Galaxien bis $R = 24$ mag verlässliche Rotverschiebungen liefert, eröffnen sich ungeahnte Möglichkeiten, die räumliche Verteilung der für den Gravitationslinseneffekt verantwortlichen Massenkonzentrationen genau zu berücksichtigen. Erst diese völlig neuartige Analyse wird es ermöglichen, die wahre, entfernungsabhängige Massenverteilung von Abell 901/902 zu entschlüsseln. Daraus lassen sich dann verlässliche Werte für das Verhältnis M/L ermitteln.

COMBO-17 ist derzeit weltweit der einzige Versuch, eine dreidimensionale Gravitationslinsenanalyse durchzuführen. Wir erwarten daraus neue Antworten auf die Frage nach dem universellen Verhältnis M/L oder inwieweit Massenkonzentrationen in der Dunklen Materie die Galaxienentstehung gefördert haben.

(Christian Wolf, Klaus Meisenheimer, A. Borch, S. Phleps, H.-W. Rix, H.-J. Röser)

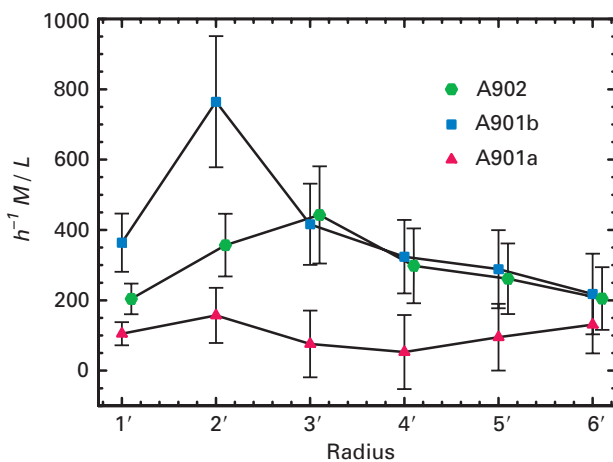


Abb. II.16: Masse/Leuchtkraft-Verhältnisse in den drei Haufen in Abhängigkeit vom Abstand zur Zentralgalaxie. (Gray et al.)

III Instrumentelle Entwicklungen

Die Leistungsfähigkeit eines Teleskops hängt entscheidend von der Qualität und Effizienz des Messinstruments ab, das in seiner Brennebene angebracht ist. Am MPIA wurden in den vergangenen Jahren eine ganze Reihe wissenschaftlicher Instrumente entwickelt und gebaut, mit denen sich die Effizienz der Teleskope deutlich verbessern und deren Einsatzgebiete erheblich erweitern ließ. Zur Zeit entstehen am Institut mehrere Instrumente, die sowohl an bodengebundenen Observatorien als auch in Weltraumteleskopen zum Einsatz kommen werden. Diese High-Tech-Geräte werden einen bedeutenden Anteil am Fortschritt der Astronomie haben.

Die Instrumente werden in den Werkstätten des MPIA oft in Zusammenarbeit mit kleinen und großen Firmen gebaut. Die von den Wissenschaftlern gestellten Anforderungen konfrontieren diese Unternehmen immer wieder mit völlig neuen Aufgaben. Das hierbei erarbeitete Know-how stärkt deren Wettbewerbsfähigkeit auf dem Weltmarkt. Es folgt eine Übersicht über die neueren Instrumente des MPIA und den aktuellen Stand im Berichtsjahr.

Adaptive Optik

Theoretisch wächst das Auflösungsvermögen eines Teleskops, also seine Fähigkeit, zwei nahe beieinander stehende Objekte noch getrennt abzubilden, mit dem Durchmesser des Hauptspiegels. In der Praxis verschmiert jedoch die Luftunruhe länger belichtete Aufnahmen

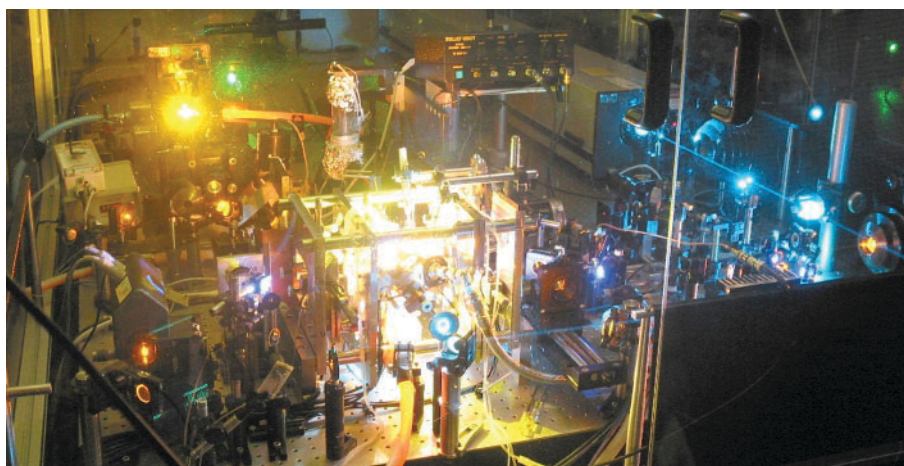
so stark, dass die Auflösung unabhängig vom Spiegeldurchmesser eine halbe bis eine ganze Bogensekunde beträgt.

Astronomen und Ingenieure vom MPIA haben in den vergangenen Jahren am Calar-Alto-Observatorium in Zusammenarbeit mit Kollegen vom MPI für extraterrestrische Physik in Garching (MPE) ein so genanntes adaptiv optisches System für den nahen Infrarotbereich (ALFA) gebaut, mit dem sich die Bildschwankungen während der Belichtung korrigieren lassen (vgl. Jahresbericht 2000, S. 32). Auf diese Weise kann man die theoretisch mögliche Auflösung, die Beugungsgrenze, erreichen.

Am Calar Alto konnte gezeigt werden, dass ALFA auch mit einem künstlichen Laserleitstern arbeiten kann. Ein solches Gerät besteht aus einem Laser, der parallel zur optischen Achse zum Himmel gerichtet wird. In etwa 90 Kilometern Höhe regt der Laserstrahl Natrium-Atome zum Leuchten an. Der dadurch entstehende Lichtfleck dient der adaptiven Optik als Referenzstern. Die mit diesem Instrument gewonnenen Erfahrungen werden nun am Very Large Telescope der ESO und am Large Binocular Telescope zum Tragen kommen.

Das 8-Meter-Teleskop YEPUN des VLT erhält als erstes eine Laserleitstern-Einrichtung. Hierin wird ein Natrium-Laser, genannt PARSEC, einen kontinuierlichen Strahl mit 10 bis 15 Watt Leistung produzieren (Abb. III.1). Dieses

Abb. III.1: Blick in den Laboraufbau des Prototyps von PARSEC am MPE: Hinten links erkennt man den Hauptlaser, vorne den Verstärker. (Bild:MPE)



Instrument entwickeln Forscher des MPIA und das MPE gemeinsam. Das MPIA steuert ein so genanntes LIDAR (Light Detecting and Ranging) bei. Hierbei handelt es sich um einen gepulsten Laser, mit dem sich die Höhe der Natriumschicht in der Atmosphäre und die dortige Konzentration der Natriumatome messen lässt.

In die Entwicklung des LIDAR sind die Erfahrungen eingegangen, welche die Astronomen mit ALFA gemacht haben. Hierbei hatte sich erwiesen, dass ein effektiver Einsatz eines Laserleitsterns während der Beobachtungen ein eingehendes Studium der atmosphärischen Bedingungen voraussetzt. Versuche im Jahre 2000 mit einem LIDAR am 3,5-m-Teleskop am Calar Alto waren erfolgreich, so dass man sich für den Bau eines vergleichbaren Gerätes im Rahmen von PARSEC entschloss.

Mit dem Bau des LIDAR wurde kürzlich begonnen. Im Mai 2003 will die ESO das Gerät abnehmen, so dass im darauf folgenden Oktober PARSEC in Betrieb gehen könnte. Es wird anfangs gemeinsam mit NAOS/CONICA (Kapitel II.1) arbeiten. Im Jahre 2004 wird dann voraussichtlich SINFONI, das zweite Fokalinstrument an YEPUN,

in Betrieb gehen und ebenfalls mit dem Laserleitstern arbeiten.

Für das LBT wird derzeit ein anderes Instrument getestet, ein SCIDAR (Scintillation Detection and Ranging), mit dem das adaptiv optische System des LBT optimiert werden soll. Mit adaptiv optischen Systemen können in Großteleskopen die durch die atmosphärische Turbulenz verursachten Bildverzerrungen nur zum Teil kompensiert werden. Davon sind vor allem Objekte außerhalb der Achse der adaptiven Optik betroffen. Die Stärke dieses so genannten Anisoplanasie-Effekts hängt im Wesentlichen von der vertikalen Struktur der atmosphärischen Turbulenz ab. Befinden sich während einer Aufnahme mit adaptiver Optik mehrere helle Sterne im Bildfeld, so lässt sich dieser Effekt nachträglich abschätzen, um gute photometrische und astrometrische Messungen vorzunehmen. Zum einen ist dies aber nicht immer der Fall, und zum anderen sind diese Schätzungen stark fehlerbehaftet. Hier soll SCIDAR zum Einsatz kommen.

Mit SCIDAR beobachtet man einen Doppelstern und bildet ihn „unscharf“ ab (genauer ist es eine Abbildung in der Pupillenebene). Aus der Vermessung der Helligkeitsverteilung im Pupillenbild der beiden Sterne lässt sich die vertikale Turbulenzstruktur in der Atmosphäre bis in etwa zwanzig Kilometer Höhe ermitteln. Während aus Messungen der Phasenverzerrungen innerhalb der Pupille keine Kenntnisse über die vertikale Struktur der Turbulenz gewonnen werden können, ist die Stärke der Szintillation abhängig von der Distanz zwischen einer Turbulenzschicht und der Beobachtungsebene. Daher enthält die Helligkeitsverteilung in der Pupille Informationen über die Höhenverteilung der Turbulenz (Abb. III.2).

Die Hardware des SCIDAR hat das Steward-Observatorium gebaut, während das MPIA die Software zum Auswerten der Daten beisteuert. Im Berichtsjahr wurde das Instrument am Vatican Advanced Technology Telescope getestet, danach wird es am LBT zum Einsatz kommen. Bewährt es sich dort, könnte das Instrument auch am VLT als eine Art „erweiterte Wetterstation“ arbeiten.

(S. Hippler, M. Feldt, M. Kasper, R.-R. Rohloff, K. Wagner)

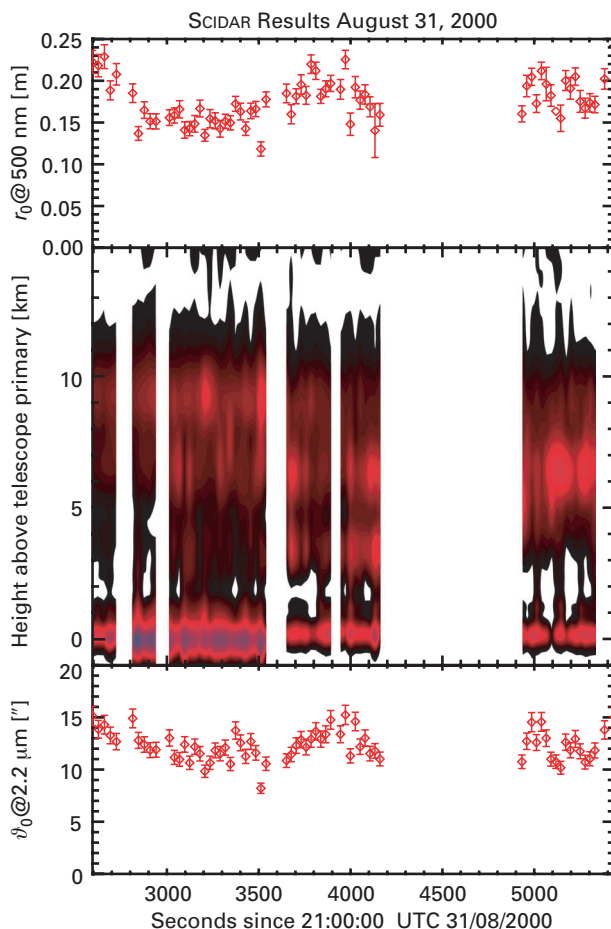


Abb. III.2: Typische Ergebnisse von SCIDAR-Messungen, gewonnen am Calar-Alto-Observatorium. Die Messwerte oben und unten kennzeichnen zwei wichtige Größen der adaptiven Optik, den Fried-Parameter und den isoplanatischen Winkel. In der Mitte erkennt man die turbulente Struktur der Atmosphäre.

Multikonjugierte adaptive Optik (MCAO)

Adaptiv optische Systeme benötigen stets einen Referenzstern mit bestimmter Mindesthelligkeit. Eine optimale Korrektur ist auch nur innerhalb eines bestimmten Winkels um diesen Stern herum möglich. Außerhalb davon wird die Abbildung unschärfer. Diese Einschränkung will man zukünftig durch den Einsatz der so genannten multikonjugierten adaptiven Optik (MCAO) umgehen.

Um diese Technik erstmals zur Einsatzreife zu bringen, entsteht am MPIA eine eigene Arbeitsgruppe. Langfristig soll ein MCAO auch das LBT mit beugungsbegrenzten Bildern im kombinierten Fokus versorgen – und dies nicht nur im nahen Infrarot sondern auch bei Wellenlän-

gen um 800 nm. Bei einer Beobachtungswellenlänge von einem Mikrometer beträgt die Beugungsgrenze des LBT neun Millibogensekunden. Ziel ist es, das gesamte Gesichtsfeld von einer Bogenminute nahezu beugungsbegrenzt abzubilden.

Bei der ursprünglichen adaptiven Optik wird nur eine Richtung im Bildfeld korrigiert. Bei der MCAO wendet man diese Technik auf mehrere Richtungen und mehrere Referenzsterne an. Dabei geht man davon aus, dass die Atmosphäre in einige wenige dünne turbulente Schichten zerfällt (Abb. III.3).

Im Laufe der nächsten drei Jahre soll ein MCAO-Instrument mit der ebenfalls am MPIA gebauten LINC/NIR-VANA-Kamera des LBT (s.u.) gekoppelt werden. Das von einem LBT-Spiegel kommende Licht wird an einem Strahlteiler gespalten. Ein Teil läuft zu einem Wellenfrontsensor, der den mit 672 Aktuatoren ausgerüsteten adaptiven Sekundärspiegel eines LBT-Hauptspiegels kontrolliert. Der Anteil des Lichtes, der den Strahlteiler passiert, wird über zwei deformierbare Spiegel mit jeweils 349 Aktuatoren und über mehrere weitere Spiegel zum Fokus gelenkt. Das Gleiche passiert mit dem Strahlenbündel, das vom anderen LBT-Hauptspiegel kommt. Im gemeinsamen Brennpunkt interferieren dann die phasengleichen Wellenzüge.

Insgesamt werden in diesem Instrument sechs Wellenfrontsensoren sowie sechs adaptive Spiegel mit insgesamt 2740 Aktuatoren arbeiten – ein bisher einmaliges Konzept, das die räumliche Auflösung bodengebundener Teleskope über ein großes Bildfeld nahezu unabhängig von der Atmosphäre macht. Die großen Bildfelder der Wellenfrontsensoren von ein bis zwei Bogenminuten erleichtern außerdem die Auswahl von ausreichend hellen Referenzsternen für die adaptive Optik, ein ganz entscheidender Aspekt um möglichst viele wissenschaftliche Programme mit diesem Instrument durchführen zu können.

LUCIFER und LINC – zwei Instrumente für das LBT

Wie im ersten Kapitel berichtet, ist das MPIA im Rahmen der „LBT -Beteiligungsgesellschaft“ (LBTB) gemeinsam mit dem MPI für extraterrestrische Physik in Garching, dem MPI für Radioastronomie in Bonn und dem Astrophysikalischen Institut Potsdam sowie der Landessternwarte Heidelberg zu einem Viertel an Kosten und Nutzung des Large Binocular Telescope (LBT) beteiligt. Anders als alle bisherigen Teleskope wird das LBT mit zwei Sammelspiegeln mit einem Durchmesser von jeweils 8.4 Metern bestückt sein. Mit dem ersten Spiegel soll das Teleskop 2004 in Betrieb gehen, der zweite Spiegel folgt ein Jahr später. Dann soll auch Interferometrie möglich sein.

Die deutschen Partner bauen unter der Leitung der Heidelberger Landessternwarte für das LBT zwei Nahinfrarot-Spektrographen, genannt LUCIFER. 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. Darüber hinaus sind das MPI für extraterrestrische Physik in Garching, die Universität Bochum sowie die FH für Technik und Gestaltung in Mannheim an LUCIFER beteiligt.

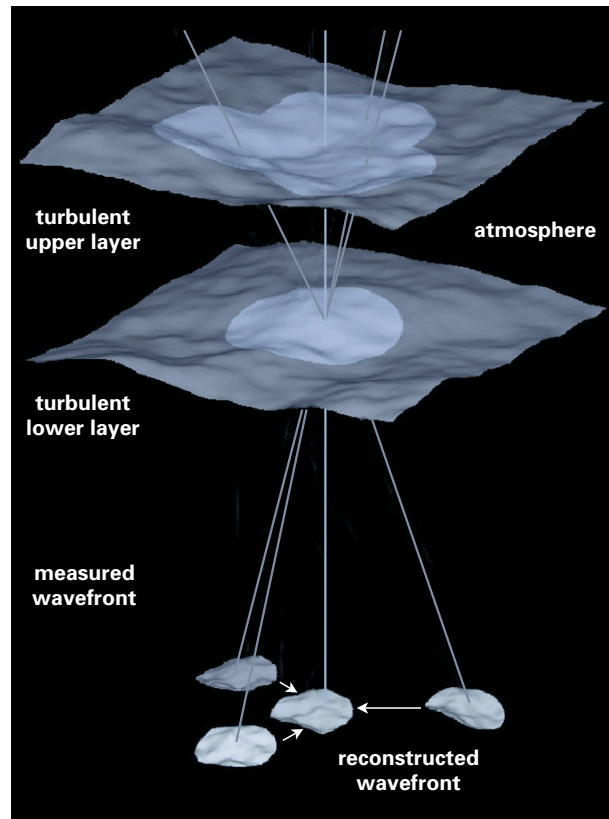


Abb. III.3: Störung einfallender Lichtstrahlen aus mehreren Richtungen in zwei atmosphärischen Schichten. Aus den gemessenen Wellenfronten, lässt sich die Wellenfront im Zentrum berechnen, wo sich das astronomische Objekt befindet.

Das erste Exemplar von LUCIFER soll ab 2004 in der Fokalebene des ersten großen Spiegels arbeiten. Die baugleiche Dublette wird 18 Monate später im Fokus des zweiten Spiegels in Betrieb gehen. Mit LUCIFER werden sowohl Direktaufnahmen als auch Langspaltspektroskopie im Bereich von 0.85 μm bis 2.45 μm möglich sein. Um störende Wärmestrahlung vom Instrument zu unterdrücken, wird LUCIFER mit flüssigem Stickstoff auf 77 K oder sogar darunter gekühlt. Insgesamt sind sechs Beobachtungsmoden vorgesehen:

- Seeing-begrenzte Aufnahmen mit einem Bildfeld-durchmesser von 4'
- Langspaltspektroskopie über eine Länge von 4' und Multiobjektspektroskopie
- Beugungsbegrenzte Aufnahmen mit einem Bildfeld-durchmesser von 0.5' und Langspaltspektroskopie sowie
- integrale Feldspektroskopie.

Bei beugungsbegrenzten Aufnahmen beträgt die Auflösung des LBT, abhängig von der Wellenlänge, $0''.031$ bei $1.23\ \mu\text{m}$, $0''.041$ bei $1.65\ \mu\text{m}$ und $0''.056$ bei $2.2\ \mu\text{m}$. Um in allen Bereichen der Seeing-begrenzten Aufnahmen eine optimale Bildqualität zu erhalten, müssen die Kameras entsprechend dem Beobachtungsmodus ausgetauscht werden. Insgesamt sind drei Kameras geplant, deren Auflösung jeweils $0''.015$, $0''.12$ und $0''.25$ pro Pixel beträgt. Als Detektor ist ein Infrarot-Array mit 2048×2048 Pixeln vorgesehen.

Mit LUCIFER sollen im nahen Infrarot vor allem lichtschwache Objekte untersucht werden. Hierzu zählen zum Beispiel junge Galaxien, deren Licht stark rotverschoben ist. Bedeutende Fortschritte erhoffen sich die Astronomen auch von der Spektroskopie Brauner Zwerge, sehr schwacher roter Sterne. Auch Staubscheiben um junge Sterne und in den Zentralgebieten aktiver Galaxien zählen zu den vorrangigen Beobachtungsobjekten.

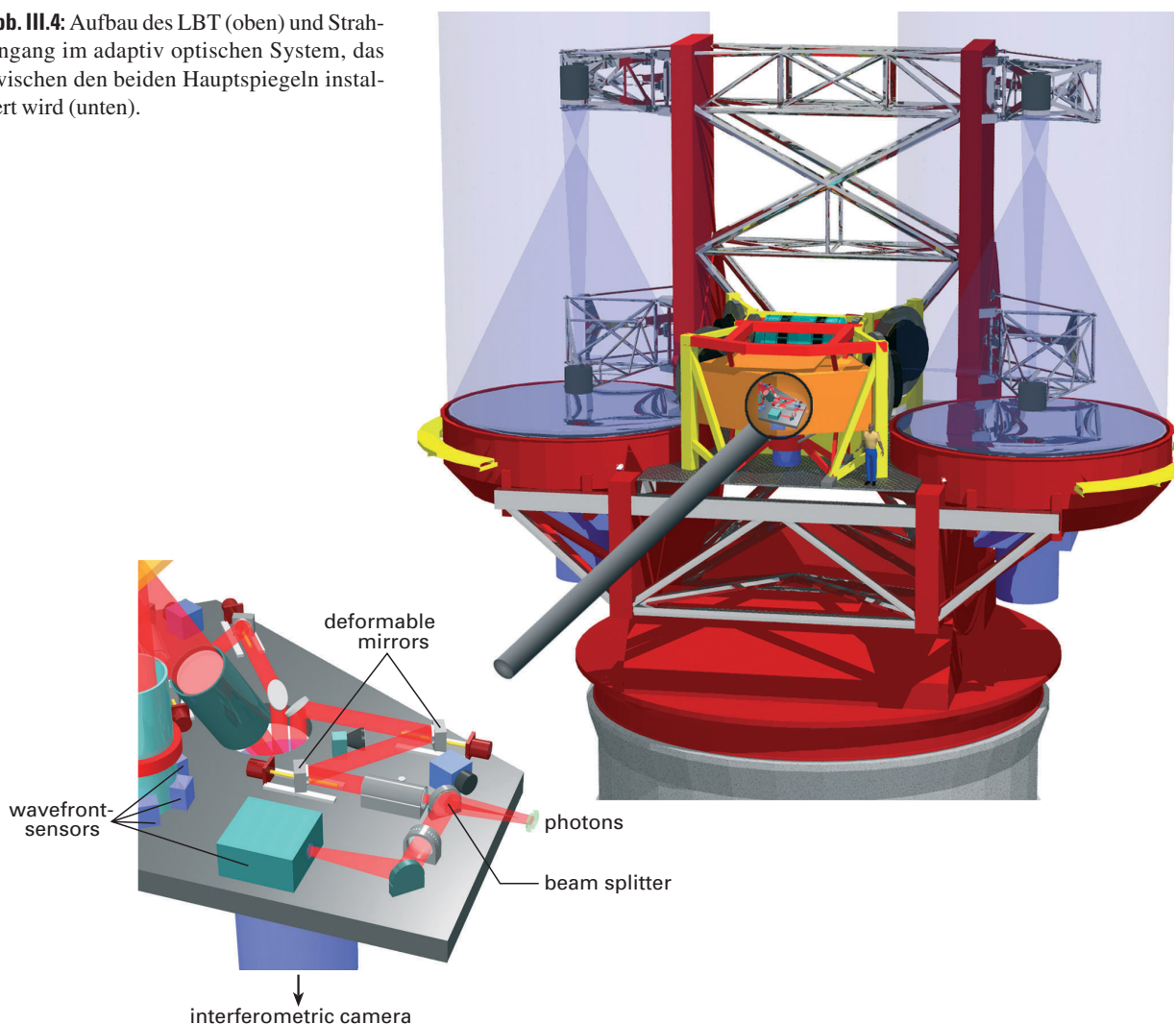
Der Strahlvereiniger wird am MPIA in Zusammenarbeit mit dem Osservatorio Astrofisico di Arcetri und der Universität Köln entworfen und konstruiert. Die adaptive Optik entwickelt ein Team des Instituts gemeinsam mit

Kollegen aus Arcetri. Ein erster Concept Design Review wurde im November 2001 durchgeführt, das endgültige Konzept soll bis Mitte 2002 stehen.

Eines der ambitioniertesten Instrumente am LBT wird das Fizeau-Interferometer LINC sein, in dem die Lichtbündel der beiden Primärspiegel phasengleich zusammengeführt werden (Abb. III.4). Das eröffnet eine bis dahin unerreichte räumliche Auflösung. Gepaart mit der großen Lichtstärke der beiden Spiegel wird das LBT damit eine Vorreiterrolle weltweit einnehmen. Ein solches Instrument ist noch nie zuvor gebaut worden und erfordert ein äußerst anspruchsvolles optisches Design. Das MPIA plant hierfür die Optik der Strahlzusammenführung. Das Institut ist dabei in ein Konsortium mit Kollegen von der Universität Köln und dem Astrophysikalischen Institut in Arcetri, Italien, eingebunden.

Mit LINC soll Interferometrie über einen Wellenlängenbereich von $0.6\ \mu\text{m}$ bis $2.4\ \mu\text{m}$ möglich sein. Es ist geplant, den gesamten Bereich mit zwei unterschiedlichen Detektoren abzudecken. Im Bereich des sichtbaren Lichts soll ein CCD mit Pixelgrößen zwischen $9\ \mu\text{m}$ und $12\ \mu\text{m}$ zum Einsatz kommen. Im nahen Infrarot von $1\ \mu\text{m}$ bis 1.4

Abb. III.4: Aufbau des LBT (oben) und Strahlengang im adaptiv optischen System, das zwischen den beiden Hauptspiegeln installiert wird (unten).



μm Wellenlänge ist an ein Infrarot-Array mit 2048×2048 , jeweils $18 \mu\text{m}$ große Pixel gedacht.

Das Interferometer soll zusammen mit einem adaptiv optischen System betrieben werden, das abhängig von der Wellenlänge ein Feld zwischen $20''$ (bei $2 \mu\text{m}$) und $5''$ (bei $0.7 \mu\text{m}$) korrigiert. Auch die erzielbare Auflösung ist wellenlängen abhängig. Sie liegt zwischen $0''.02$ (bei $2 \mu\text{m}$) und $0''.006$ (bei $0.7 \mu\text{m}$).

LINC ist als zweistufige Entwicklung vorgesehen. Zunächst soll die Beugungsgrenze mit nur einem natürlichen Leitstern erreicht werden; in einer zweiten Stufe (NIRVANA) soll dann die oben beschriebene multikonjugierte adaptive Optik (MCAO) auch bei Wellenlängen unterhalb von einem Mikrometer zum Einsatz kommen.

Die astronomischen Beobachtungen werden sich auf kompakte Objekte konzentrieren, deren Liste beliebig lang ist: Sie reicht von der räumlichen Ausdehnung von Supernovae über die Struktur protostellarer Scheiben bis zur Suche nach extrasolaren Planeten.

(T. Herbst, R. Lenzen, R. Ragazzoni, H.-W. Rix, R.-R. Rohloff, D. Andersen, H. Baumeister, P. Bizenberger, B. Grimm, W. Laun, Ch. Leinert)

OMEGA 2000 – Weitfeld-Infrarotkamera für den Calar Alto

Wesentliche Erkenntnisse sind in Zukunft von Forschungsprojekten zu erwarten, bei denen schwache Lichtquellen in großen Himmelsarealen gesucht werden. Dieser neuen Entwicklung trägt das Institut verstärkt Rech-

nung. Als erstes entstand in Zusammenarbeit mit der ESO eine Weitfeldkamera für das 2.2-Meter-Teleskop auf La Silla (s. Jahresbericht 1998, S. 33). Im Jahr 2000 wurde der Bau einer neuen Weitfeld-Infrarotkamera für den Calar Alto, genannt Omega 2000, beschlossen.

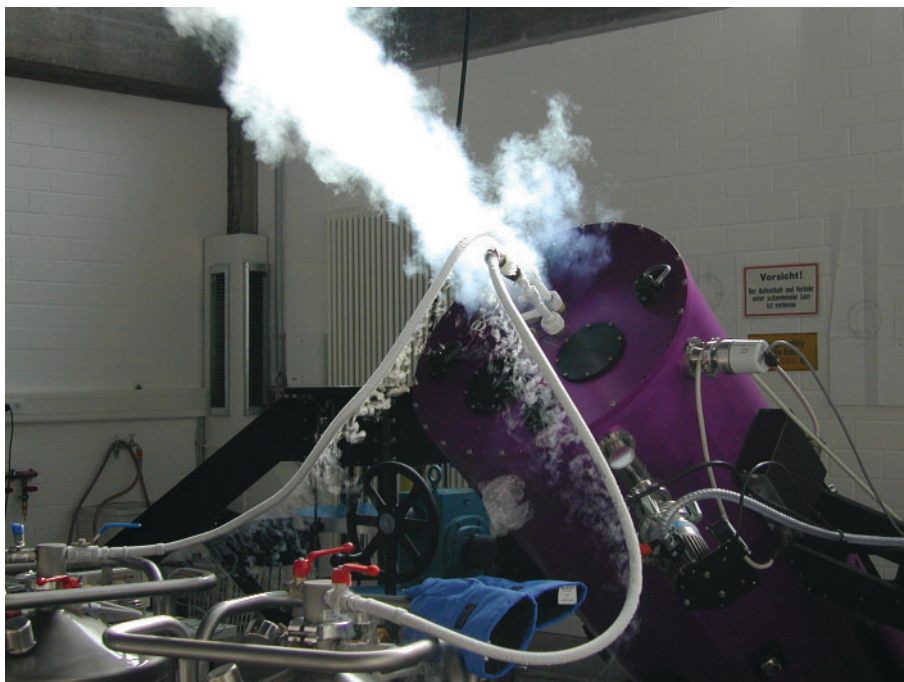
Die Entwicklung neuer Kameras hängt entscheidend von der Verfügbarkeit von Infrarotdetektoren ab. Seit kurzem sind Arrays mit 2048×2048 Pixel erhältlich. Sie sind bis zu einer Wellenlänge von $2.4 \mu\text{m}$ empfindlich und haben zwischen $0.8 \mu\text{m}$ und $2.4 \mu\text{m}$ eine Quantenausbeute von etwa 60 %.

Um die Position des Calar Alto an der vordersten Front der Infrarotastronomie zu erhalten, wurde am MPIA beschlossen, die neue Kamera OMEGA 2000 für das nahe Infrarot zu entwickeln und zu bauen. Sie wird OMEGA-PRIME ähneln, jedoch ein fünfmal größeres Gesichtsfeld mit $15' \times 15'$ aufweisen. Das entspricht einem Viertel der Vollmondfläche. Das Instrument arbeitet im Primärfokus des 3.5-Meter-Teleskops und wird dort bei einem Öffnungsverhältnis von $f/2.35$ einen Abbildungsmaßstab von $0''.45$ pro Pixel haben.

Im Berichtsjahr wurden alle wesentlichen Bauteile gefertigt bzw. geliefert. Erste Kühltests verliefen bereits erfolgreich (Abb. III.5). Der erste Einsatz am Teleskop ist momentan für Anfang des Jahres 2003 vorgesehen. Dann soll die Kamera das bisherige Arbeitspferd OMEGA-PRIME ablösen.

(H.-J. Röser, C. Bailer-Jones, M. Alter, H. Baumeister, P. Bizenberger, A. Böhm, B. Grimm, W. Laun, U. Mall, R.-R. Rohloff, C. Storz, K. Zimmermann)

Abb. III.5: OMEGA 2000: a) Kühltests im Labor.



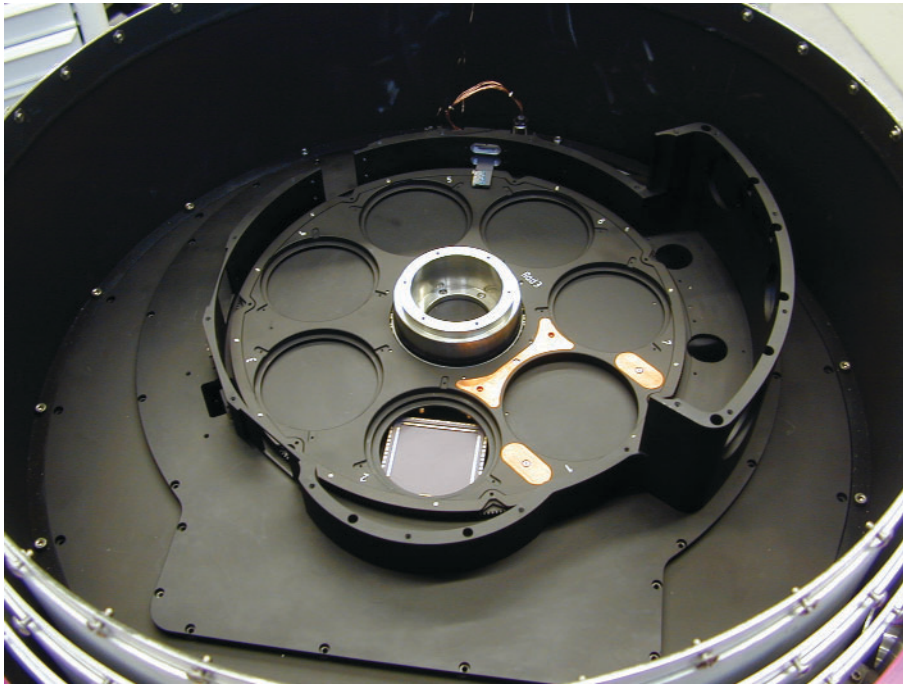


Abb. III.5: OMEGA 2000: **b)** Blick ins Innere mit dem Filterrad.

LAICA – die Weitfeldkamera für den Calar Alto

Als drittes Instrument dieser Art entstand der Large Area Imager for Calar Alto, kurz LAICA. Es wird am 3.5-Meter-Teleskop arbeiten und dort ein nutzbares, fehlerfreies Bildfeld von 44 Bogenminuten, entsprechend 115 mm Kantenlänge, erschließen. In der Brennebene befindet sich ein Mosaik aus vier CCDs mit jeweils 4096×4096 Pixeln. Die Abbildungsskala wird $0''.225$ pro Pixel sein (s. Jahresbericht 1999, S. 33).

Da die CCDs aus fertigungstechnischen Gründen nicht fugenfrei aneinander stoßen können, bleibt ein etwa 50 mm breiter Spalt frei. Daher lässt sich mit einer einzigen Aufnahme kein geschlossenes Himmelsgebiet aufnehmen. Dies kann aber ohne großen Aufwand ausgeglichen werden, indem man drei weitere Aufnahmen mit unterschiedlicher Positionierung anfertigt. Ein Satz von vier Aufnahmen überdeckt ein zusammenhängendes Feld von einem Quadratgrad, entsprechend etwa fünf Vollmondflächen.

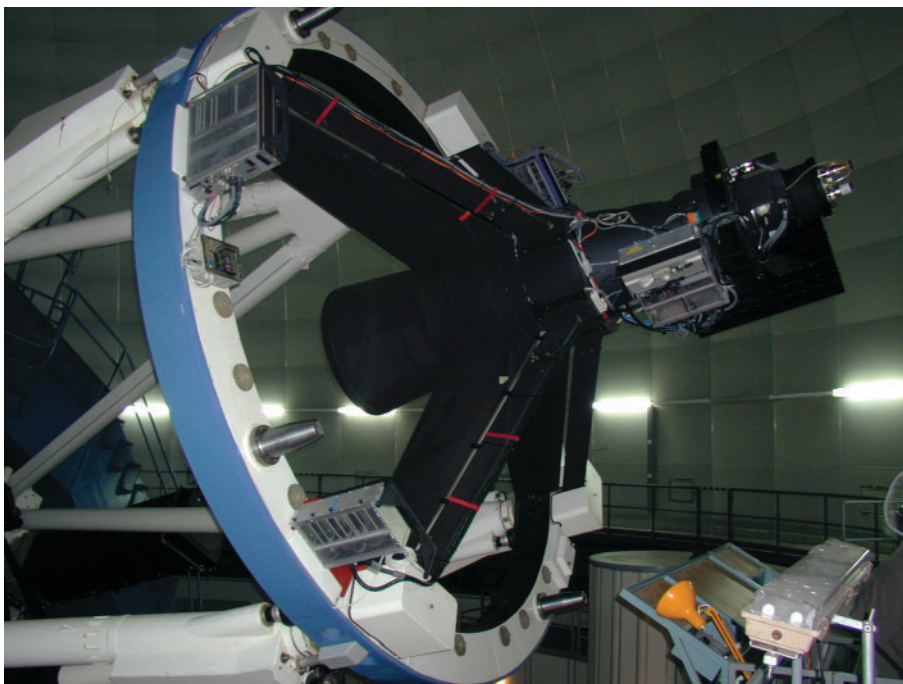


Abb. III.6: LAICA am Frontring des 3.5-m-Teleskops auf dem Calar Alto.

Zudem sind zwei kleinere CCDs integriert, die der Nachführung dienen. Damit lassen sich auch Bilddrehungen, wie sie insbesondere bei langen Belichtungszeiten auftreten können, feststellen und korrigieren. Die Nachführereinrichtung wurde im Sommer erfolgreich am Teleskop getestet.

Zunächst sind zwei Filtersätze vorgesehen. Der Filterhalter gleicht dem Magazin eines Diaprojektors. Das Magazin enthält 20 Filter, die ein Greifarm herausnimmt und in den Strahlengang geschoben.

Mit dem Bau von LAICA wurde Anfang 1999 begonnen, am 20. Mai 2001 sah LAICA erstes Licht (Abb. III.6). Es waren aber noch weitere Optimierungsarbeiten nötig, um die Abbildungsqualität zu verbessern. Im April 2002 konnte der Calar Alto Gastbeobachtern LAICA auf der Basis des „shared risk“ anbieten. Das heißt, der Gastbeobachter muss damit rechnen, dass die Kamera kurzfristig wegen dringender Tests nicht zur Verfügung steht. Das Institutsteam erwartet, dass die Kamera Ende 2002 den Routinebetrieb aufnehmen kann.

(J. Fried, H. Baumeister, W. Benesch, F. Briegel,
U. Graser, B. Grimm, K. Marien, R.-R. Rohloff,
C. Unser, K. Zimmermann)

MIDI – Infrarotinterferometer für das VLT

Das VLT wird in naher Zukunft auch als Interferometer arbeiten. Hierfür werden die Strahlengänge von zwei oder mehr Teleskopen zusammengeführt und in einer gemeinsamen Bildebene kohärent überlagert. Ein solches Interferometer verfügt über die räumliche Auflösung eines Teleskops, dessen Spiegeldurchmesser der Basislänge der beiden interferometrisch gekoppelten Teleskope entspricht. Zwei 130 Meter entfernt stehende Teleskope des VLT erzielen dann im nahen Infrarot eine Auflösung von einigen tausendstel Bogensekunden.

Eins von drei Interferometern, genannt MIDI, wird unter der Federführung des MPIA entwickelt und gebaut. Beteiligt sind auch Kollegen aus den Niederlanden und Frankreich sowie vom Kiepenheuer-Institut in Freiburg und der Thüringer Landessternwarte Tautenburg. MIDI soll Interferometrie mit zwei Teleskopen bei Wellenlängen von $8\text{ }\mu\text{m}$ bis $13\text{ }\mu\text{m}$ ermöglichen und wird in puncto räumlicher Auflösung einen gewaltigen Fortschritt in der astrophysikalischen Forschung bedeuten. MIDI soll eine Auflösung um $0''.02$ in einem Bildfeld mit etwa $2''$ Durch-

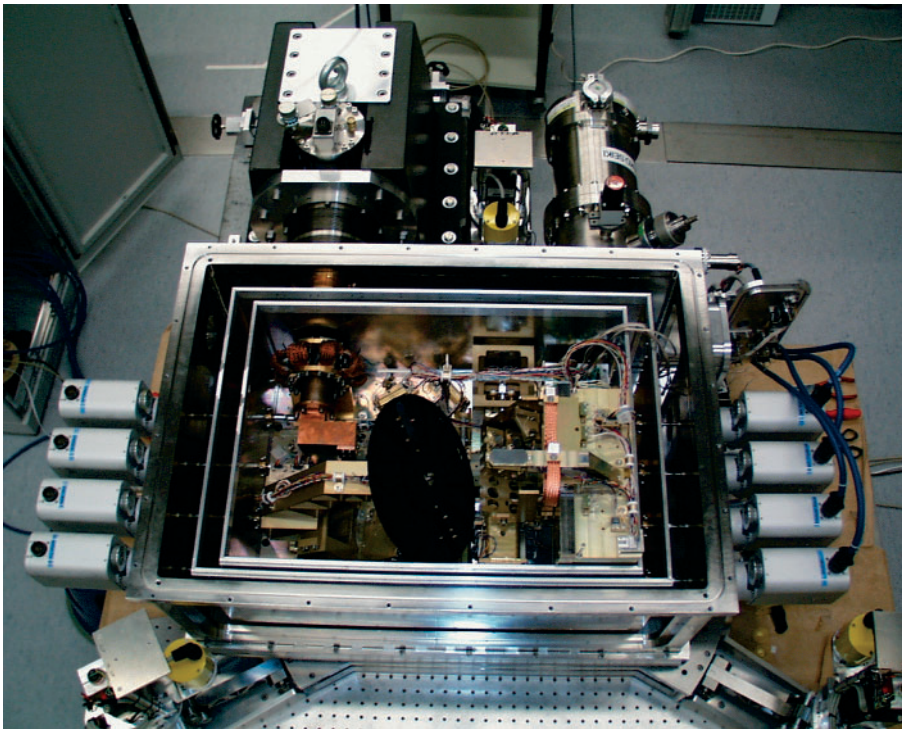
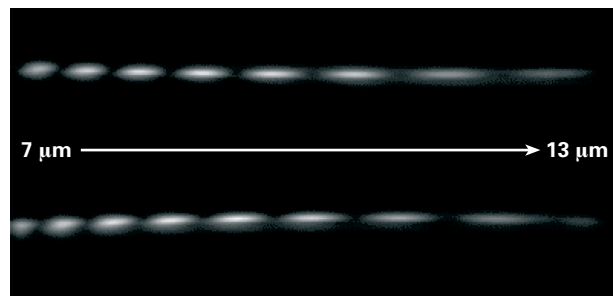


Abb. III.7: a) Blick ins Innere von MIDI. Der innere Teil der Optik wird mit dem Kühlkopf (hinten links am Gerät) und dem Detektor gekühlt. Von den optischen Komponenten ist das Filterrad (schwarz) am deutlichsten erkennbar. **b)** Das Ergebnis der Tests mit einer Laborlichtquelle: Interferenzstreifen für Wellenlängen von $7\text{ }\mu\text{m}$ (links) bis $13\text{ }\mu\text{m}$ (rechts).



messer erzielen. Der Detektor besteht aus einem Array mit 320×240 Pixel, wobei die Kantenlänge eines Pixel $50 \mu\text{m}$ beträgt. Zehn Filter ermöglichen Beobachtungen in verschiedenen Wellenlängenbereichen.

Interferometrie bei diesen Wellenlängen stellt allerhöchste Ansprüche an die Technik, wobei zwei Probleme im Mittelpunkt stehen: Die von den beiden Teleskopen kommenden Lichtwellen müssen phasengleich mit einer Genauigkeit von etwa $1 \mu\text{m}$ im Instrument zusammengeführt werden. Zur Unterdrückung der Hintergrund-Wärmestrahlung müssen große Teile des Instruments gekühlt werden. Der Detektor wird mit 4 K bis 8 K am kältesten sein, die kalte Optik liegt bei etwa 40 K und der äußere Strahlungsschild für die Kühlung bei 77 K.

Die hauptsächlich geometrisch bedingte Weglängendifferenz der von den beiden Teleskopen kommenden Strahlenbündel wird bereits zu einem großen Teil ausgeglichen sein, bevor die Strahlen in das Instrument eintreten. Durch die Himmelsdrehung verändert sich zudem die Wegdifferenz während der Beobachtung. Dieses Problem löst man, indem in einem Tunnel unterhalb der Teleskope (Delay Line genannt) ein optisches System auf einem Wagen fährt. An ihm werden die von den Teleskopen kommenden Lichtbündel reflektiert und deren Weglängen durch die Bewegung des Wagens ausgeglichen. Im Innern von MIDI wird die restliche Weglängendifferenz durch piezoelektrisch betriebene, verschiebbare Spiegel ausgeglichen. Ein Strahlteiler vereint die Strahlen zum Interferenzbild.

Das „Final Design Review“ wurde im März für Optik, Mechanik und Elektronik und im November auch für die Software von der ESO formell für abgeschlossen erklärt. Parallel dazu wurden im Labor in Heidelberg Aufbau und Test des Instruments vorangetrieben (Abb. III.7a). Das Partnerinstitut ASTRON in Dwingeloo lieferte im Mai das Herzstück des Geräts, die „kalte Optik“. Sie musste optisch justiert und schrittweise mit der Mechanik feinabgestimmt werden. Ende des Jahres konnten an einem im Labor aufgebauten künstlichen Stern erstmals interferometrische Messungen durchgeführt werden (Abb. III.7b).

MIDI soll im Oktober 2002 nach Chile gelangen. Mit dem First Light an den 8-Meter-Teleskopen ist Ende des Jahres zu rechnen. Später sollen auch Versuche mit den 1.8-Meter-Auxiliary-Teleskopen folgen. Verläuft alles nach Plan, so kann MIDI Ende 2003 den regulären Beobachtungsbetrieb aufnehmen.

Das Instrumententeam erhält über mehrere Jahre verteilt insgesamt 30 Beobachtungsnächte am VLT und eine etwa dreimal so große Zahl an den Auxiliary-Teleskopen. Derzeit ist geplant, MIDI insbesondere für die Beobachtung aktiver galaktischer Kernen (Schwarzer Löcher), junger Sterne, extrasolarer Planeten, zirkumstellarer Staubhüllen und protostellarer und protoplanetarer Scheiben sowie Doppelsterne einzusetzen.

(Ch. Leinert, U. Graser, A. Böhm, O. Chesneau, B. Grimm, T. Herbst, W. Laun, R. Lenzen, S. Ligi, R. Mathar, K. Meisenheimer, U. Neumann, E. Pitz, F. Przygodda, R.-R. Rohloff, P. Schuller, C. Storz, K. Wagner, W. Morf)

PACS – Infrarotkamera und -spektrometer für HERSCHEL (ehemals FIRST)

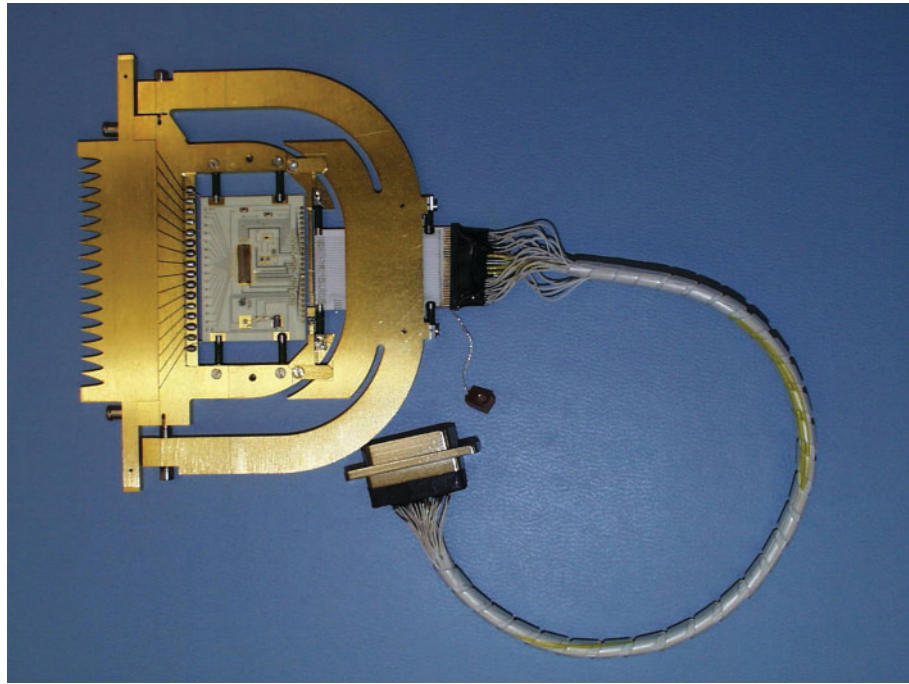
Im Jahre 2007 will die Europäische Weltraumbehörde, ESA, das Ferninfrarot-Teleskop HERSCHEL (ehemals Far-Infrared and Submillimeter Space Telescope, FIRST) starten. Es ist die vierte große Cornerstone-Mission der ESA. HERSCHEL erhält einen passiv gekühlten 3.5-Meter-Spiegel und drei wissenschaftliche Instrumente, die einen Wellenlängenbereich von $60 \mu\text{m}$ bis $700 \mu\text{m}$ abdecken sollen. Sie werden von internationalen Wissenschaftskonsortien gebaut. Ein Schwerpunkt des Forschungsprogramms wird in der Beobachtung von protostellaren Staubwolken und protoplanetaren Staubscheiben liegen. Gleichzeitig wird die Infrarotstrahlung sehr weit entfernter, junger Galaxien im Ferninfrarot- und Submillimeterbereich nachweisbar sein. Das MPIA beteiligt sich am Bau eines der Instrumente, genannt PACS (Photoconductor Array Camera and Spectrometer). Die Projektleitung liegt am MPE.

PACS soll photometrische und spektrometrische Untersuchungen im Wellenlängenbereich zwischen $60 \mu\text{m}$ und $210 \mu\text{m}$ ermöglichen (Abb. III.8). Das MPIA wird wesentlich zu der Charakterisierung und Entwicklung der Kameras und Vorverstärker sowie dem Fokalebenen-Chopper und zum Datenzentrum beitragen. Aufbauend auf den Erfahrungen mit ISO wird das Institut an den detaillierten Planungen zum Aufbau des Bodensegments für HERSCHEL und insbesondere des Kontrollzentrums für PACS beteiligt sein. Das Institut wird darüber hinaus für alle Aspekte der Kalibration von PACS vor und während des Fluges verantwortlich sein.

Die Firma Carl Zeiss in Oberkochen erhielt den Auftrag für den Bau eines flugtauglichen Chopper-Modells, basierend auf der Prototypentwicklung am MPIA. Ein Chopper hat folgende Aufgabe: Bei satellitengetragenen Infrarotbeobachtungen kann ein mehr oder weniger starkes, störendes Hintergrundsignal durch Wärmestrahlung des Teleskops und des Sonnenschildes entstehen. Um dieses Signal zu eliminieren, wird während einer Beobachtung abwechselnd das Objekt und ein benachbarter, möglichst leerer Himmelsausschnitt belichtet. Letzteres liefert den Hintergrund, der später von der eigentlichen Aufnahme abgezogen wird. Die alternierende Beobachtung zweier Himmelsgebiete erreicht man, indem man im Strahlengang einen Spiegel anbringt, der bis zu zehnmal pro Sekunde mit hoher optischer und mechanischer Präzision hin und her kippt oder auf englisch: choppt.

Für den Chopper wurden sämtliche mechanischen Komponenten des Lifetime-Modells sowie Teile für die Testaufbauten in den Werkstätten des MPIA gefertigt und an die Firma Zeiss übergeben. Die Kreuzfedergelenke für den Chopper, die während des Raketenstarts und der anschließenden dreijährigen Operationsphase großen Belastungen ausgesetzt sind, werden in zusätzlichen Lebens-

Abb. III.8: Eine der Detektorzeilen für die Infrarotkamera PACS mit 16×25 Bildelementen. Links die Eintrittsöffnungen der Lichtleiter, in der Mitte die kalte Ausleseelektronik, umgeben von dem Spannbügel zur Ausübung von Druck auf die 16 Ge:Ga-Detektoren (Bild: ANTEC, Kelkheim).



dauertests am Fraunhofer-Labor für Betriebsfestigkeit für den Einsatz im Weltraum qualifiziert.

Als größeren Beitrag zu PACS hat das Institut die Spezifikationen des kalten Kabelbaums erarbeitet. Dazu gehören die Definition aller 1148 Leitungen einschließlich

der Kaltstecker-Belegungen und aller elektrischen Parameter. Dieses Dokument ist auch eine wichtige Grundlage für das Thermalkonzept des Instrumentes.

(D. Lemke, V. Galperine, U. Grözing, R. Hoffert, U. Klaas, R. Vavrek, H. Baumeister, A. Böhm)

IV Wissenschaftliche Arbeiten

IV.1 Galaktische Astronomie

Entwicklungsphasen von Bok-Globulen

An verschiedenen Stellen in der Milchstraße haben sich Staub und Gas aufgrund der Schwerkraft zu großen, dichten Wolken zusammengefunden. Sie sind potenzielle Sternentstehungsgebiete. Die Größen dieser Nebel erstreckt sich von nicht einmal einem Lichtjahr bis zu mehreren hundert Lichtjahren. Die kleinsten unter ihnen heißen Bok-Globulen. Zwei dieser kompakten Staubwolken wurden im vergangenen Jahr am Institut besonders detailliert studiert. Eine der kleinsten bekannten Globulen, Barnard 68, befindet sich in dem physikalisch interessanten Zustand eines Gleichgewichts zwischen Schwerkraft und innerem Gasdruck. Die zweite Globule, CB 34, ist bereits weiter entwickelt und befindet sich in einer Phase heftiger Sternentstehung.

Bok-Globulen sind allein stehende, dichte Staubwolken, die sich als dunkle Flecken vor einem sternreichen Hintergrund abheben. Schon in den 1940er Jahren untersuchte der holländische Astronom Bart Bok sehr viele dieser Nebel und erstellte einen ersten Katalog. Boks damalige Vermutung, dass im Innern der Globulen Sterne entstehen können, ließ sich erst in jüngerer Zeit beweisen. Man schätzt heute die Gesamtzahl der Globulen in der Milchstraße auf etwa 100 000, ihre Größen liegen in einem Bereich zwischen einigen Zehnteln und wenigen Lichtjahren, ihre Massen in einen Bereich zwischen etwa einer und hundert Sonnenmassen.

Diese kompakten Nebel können sich auf unterschiedliche Weise gebildet haben: Entweder entsteht zufällig eine kleine Materieverdichtung, die weiter anwächst, indem sie Materie aus der Umgebung anzieht. Oder die Globulen sind Überreste einer ehemals viel größeren Staubwolke, die sich durch intensive UV-Strahlung und Teilchenwinde junger Sterne weitgehend aufgelöst hat.

Barnard 68 – eine Globule kurz vor dem Kollaps?

Barnard 68 (B 68) ist eine der nächsten und gleichzeitig kleinsten bekannten Globulen. In ihrer näheren Umgebung gibt es drei weitere Globulen und den großen Ophiuchus-Wolkenkomplex. Es besteht daher die Vermutung, dass B 68 und die anderen Globulen Überreste einer ursprünglich viel größeren Wolke sind. Die Eigenschaften

dieser dichten Wolken lassen sich im sichtbaren Licht kaum untersuchen, weil sie hier undurchsichtig sind. Im Jahr 2001 hatten Astronomen der ESO die Wolke im nahen Infrarot beobachtet. Sie nutzten die Eigenschaft aus, dass elektromagnetische Strahlung mit wachsender Wellenlänge den Staub zunehmend durchdringen kann. Bei Wellenlängen bis zu $2,2\ \mu\text{m}$ wird die Globule langsam durchsichtig, so dass die Hintergrundsterne sichtbar werden (Abb. IV.1). Insgesamt ließen sich im nahen Infrarot über tausend Sterne identifizieren. Sie durchleuchten die Globule von hinten und ermöglichen es so, die Lichtabschwächung (den Extinktionsgrad) zu messen, woraus sich wichtige Zustandsgrößen ableiten lassen. Hierbei zeigte es sich, dass die Extinktion im Bereich des sichtbaren Lichts im Zentrum einen Wert von 35 Größenklassen, entsprechend einer Lichtabschwächung um den Faktor 10^{14} , erreicht. Darüber hinaus fanden sich im Innern von B 68 keine nennenswerten Verdichtungen, das heißt, an keiner Stelle hat Sternentstehung eingesetzt.

Für die weiteren Untersuchungen war die Erkenntnis bedeutsam, dass sich die gesamte Wolke in einem Gleichgewichtszustand befindet, in dem sich die nach innen gerichtete Schwerkraft und der nach außen wirkende kinetische Gasdruck etwa die Waage halten. Vermutlich wird die Schwerkraft in naher Zukunft die Überhand gewinnen, so dass sich die Wolke zusammenzieht, bis im Zentrum möglicherweise ein Stern entsteht. Eine Wolke, die sich wie B 68 in einem Gleichgewichtszustand befindet, nennt man Bonnor-Ebert-Sphäre. Dieser Zustand ist aus astronomischer Sicht besonders interessant, weil er physikalisch klar und einfach definiert ist: Die Struktur der Wolke wird hier vollständig durch die kinetische Temperatur und die Zentralkichte des Gases bestimmt.

Astronomen des Instituts beobachteten B 68 gemeinsam mit Kollegen von der Universität Helsinki und der ESO mit dem schwedischen Submillimeter-Teleskop SEST auf La Silla (Chile) bei Wellenlängen von 1.36 mm und 2.7 mm. In diesem Bereich befinden sich drei Linien der isotopischen Moleküle ^{13}CO und C^{18}O , deren Messung es erlaubt, die Häufigkeit des CO zu bestimmen. CO ist nach dem molekularen Wasserstoff das zweithäufigste Molekül im Innern von Staubwolken und eignet somit für detaillierte Untersuchungen besonders gut.

Die Astronomen wählten zwei Ansätze, um aus diesen Daten die Dichte des CO-Gases und seine Verteilung zu berechnen: Im ersten Modell gingen sie von einer konstanten Anregungstemperatur für die beobachteten Linienübergänge

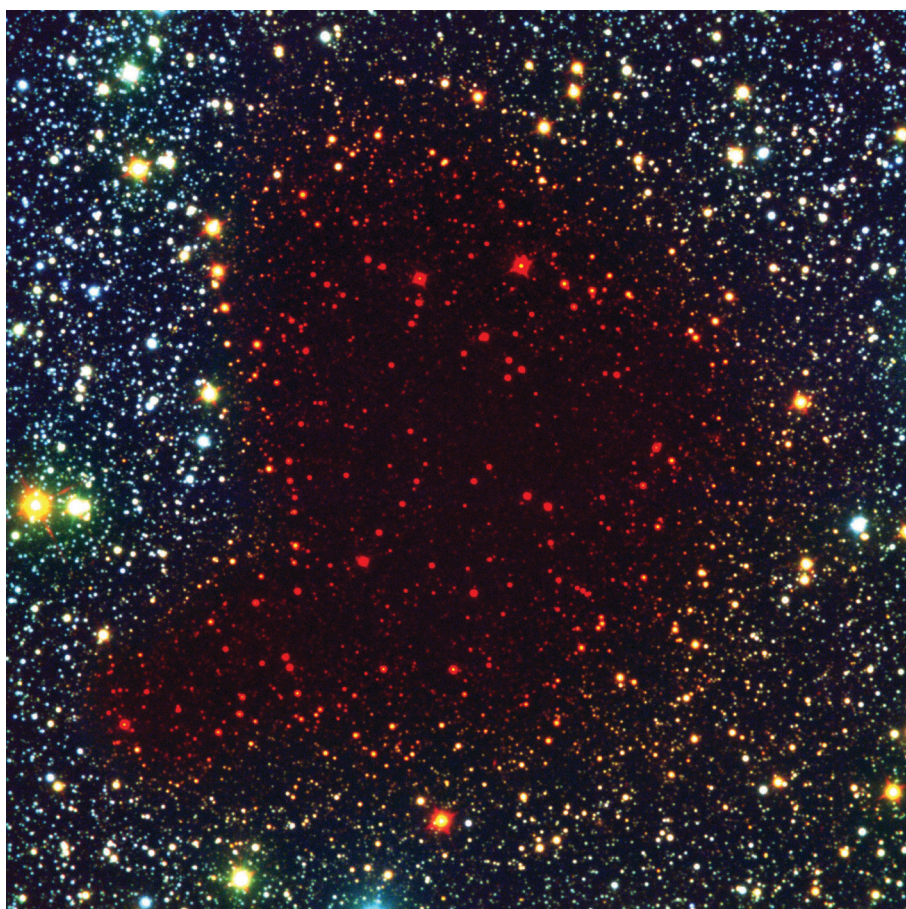
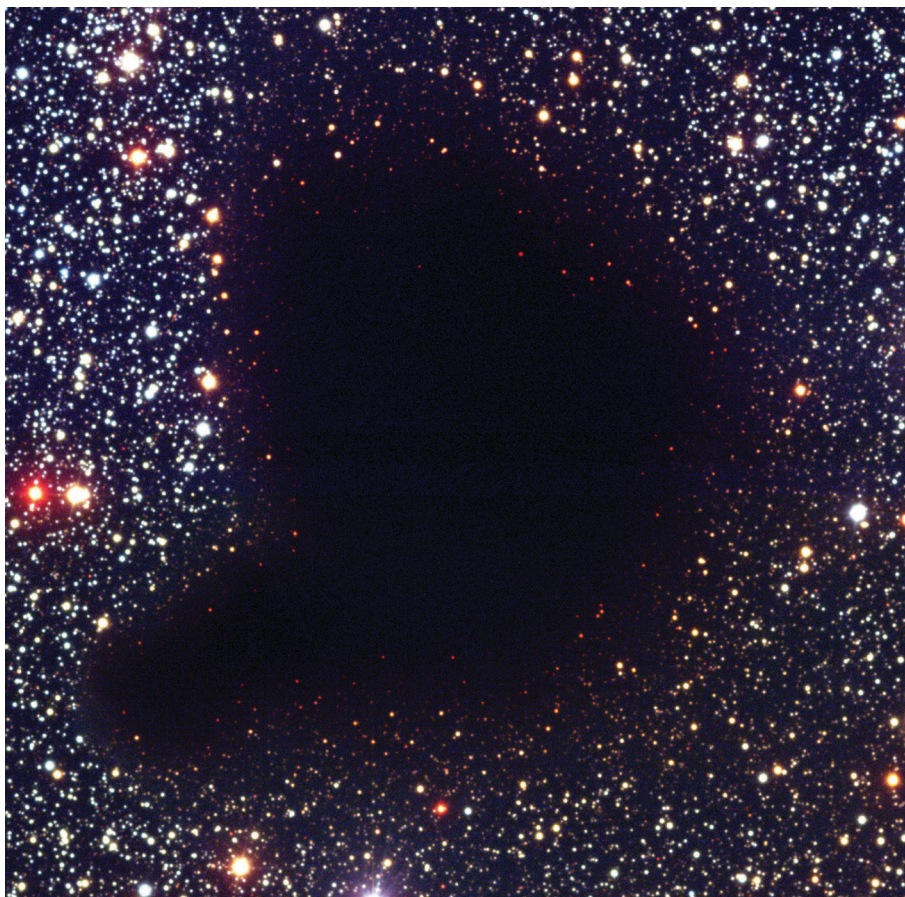


Abb. IV.1: Die Bok-Globule B 68, aufgenommen durch mehrere Farbfilter mit dem Very Large Telescope und dem New Technology Telescope der ESO. **Oben:** Im Bereich des sichtbaren Lichts und ist die Wolke undurchsichtig. **Unten:** Bei 2.2 μm Wellenlänge (K-Filter) erscheinen viele Hintergrundsterne (Bild: ESO).

der CO-Moleküle aus. Im zweiten simulierten sie die Anregungsverhältnisse der Globule, ausgehend von einer Bonnor-Ebert-Sphäre in einem externen Strahlungsfeld.

Abb. IV.2 zeigt die Säulendichte von $C^{18}O$. (Die Säulendichte wird über alle Teilchen pro Flächeneinheit im Sehstrahl.) $C^{18}O$ ist das seltenere Molekül, dessen Linien auch bei der hohen Dichte von B 68 nicht in die Sättigung geraten. Deshalb sollte das in $C^{18}O$ gemessene Linienprofil von B 68 dasselbe Aussehen haben wie das zuvor gemessene Extinktionsprofil (bei einem konstanten Staub/Gas-Verhältnis). Dies ist jedoch nicht der Fall, wie Abb. IV.3 demonstriert. Im Zentralgebiet ist die Säulendichte lediglich um einen Faktor drei bis vier höher als in den Randbereichen. Die Infrarotbeobachtungen der ESO-Astronomen hatten dagegen einen viel stärkeren Anstieg der Extinktion von außen nach innen ergeben.

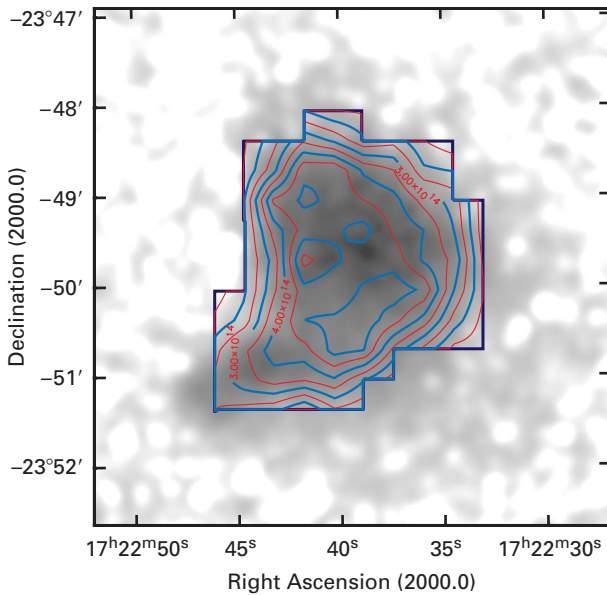


Abb. IV.2: Die aus der Beobachtung der Moleküllinie abgeleitete Verteilung der Säulendichte von $C^{18}O$. Die Konturlinien geben die Dichte in Teilchen pro Quadratzentimeter an.

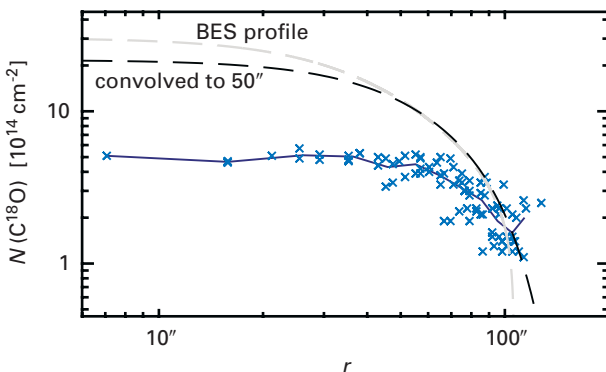


Abb. IV.3: Radiale Verteilung der $C^{18}O$ -Säulendichte (Kreuze). Die beiden gestrichelten Kurven geben zum Vergleich den Dichteverlauf einer idealen Bonnor-Ebert-Sphäre wieder. Man erkennt die Abreicherung des CO-Gases im Zentralbereich.

Dieses Verhalten lässt sich am einfachsten damit erklären, dass mit zunehmender Staubbichte ein steigender Anteil des CO-Gases auf den Staubeilchen ausfriert. (Diesen für das interstellare Medium sehr bedeutenden Vorgang haben Astronomen des MPIA auch mit dem Infrarotobservatorium ISO studiert, wie im folgenden Kapitel „Interstellarer Eisstaub“ beschrieben wird.) Dadurch verschwindet ein wachsender Anteil aus der Gasphase und ist nicht mehr nachweisbar. Es wurde angenommen, dass in B 68 ein Fließgleichgewicht herrscht – ein Gleichgewichtszustand zwischen dem Ausfrieren des CO-Gases auf festen Partikeln (Adsorption) und dem Wieder-verdampfen (Desorption) aufgrund der Erhitzung einzelner Partikel z.B. durch kosmische Strahlung. Adsorptions- und Desorptionsraten hängen von der Teilchengröße, der Staub- und Gastemperatur und der äußeren Strahlung ab, welcher die Staubeilchen ausgesetzt sind. Aus den Beobachtungsdaten konnten die Astronomen das Verhältnis von Adsorptions- zu Desorptionsrate innerhalb gewisser Grenzen bestimmen.

Die numerischen Simulationen des zweiten Ansatzes, bei dem die konstante Linienanregung nicht mehr vorausgesetzt werden muss, bestätigen die Ergebnisse der ersten Vorgehensweise, wonach das Ausfrieren des CO-Gases der entscheidende Prozess für das Zustandekommen der beobachteten Häufigkeitsverteilung ist und das Wolkengas eine kinetische Temperatur von 8 Kelvin besitzt. Dieser Wert fixierte dann die Entfernung von B 68 zu 80 pc (260 Lj), und das ist wesentlich weniger, als bisher angenommen.

Daraus ergaben sich auch weitere interessante Werte für B 68. Demnach besitzt die Globule einen Durchmesser von nur 0.04 pc (0.13 Lj). Übertragen auf unser Sonnensystem bedeutet dies, dass sie den Raum um die Sonne bis etwa an den Innenrand der Oort'schen Wolke ausfüllen würde. Der Gasdruck am Rand der Globule beträgt $1.7 \cdot 10^{-12}$ Pa, was mit dem für die Umgebung unabhängig bestimmten Gasdruck, der die Globule eingrenzt, gut übereinstimmt. Im Zentrum herrscht eine Dichte von $2.6 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ und die Gesamtmasse beträgt nur 0.7 Sonnenmassen. Damit ist B 68 die masseärmste und am nächsten gelegene bekannte Bok-Globule.

Diese eingehende Analyse der Beobachtungsdaten ermöglichte es, die Frage nach der Adsorption und Desorption des CO-Gases quantitativ zu beantworten. Der „Abreicherungsfaktor“ konnte als Funktion der Gasteilchendichte und der Adsorptions- und Desorptionskoeffizienten dargestellt werden, das heißt sein radialer Verlauf innerhalb der Globule wurde bestimmt. Im Zentrum der Wolke befinden sich nur zwischen 0.5 % und 5 % aller CO-Moleküle in der Gasphase. Der weitaus größte Teil ist auf den Staubeilchen ausgefroren.

Im Mai 2002 werden die Astronomen des Instituts und der Universität Helsinki die Globule mit dem 100-m-Radioteleskop in Effelsberg beobachten. Durch Untersuchung der Linien des Ammoniak-Moleküls, das in den dichtesten Regionen interstellarer Wolken zu finden ist, können die

kinetische Temperatur und die Dichte (statt zuvor die Säulendichte) des Gases im Zentrum von B 68 genau bestimmt werden. Sollten die Ergebnisse mit den auf den CO-Beobachtungen basierenden Vorhersagen übereinstimmen, so würde nicht nur der Zustand des hydrostatischen Gleichgewichts eindrucksvoll bestätigt. Vielmehr würde B 68 zur Globule mit den genauest bekannten Werten für Dichte, Masse und Entfernung überhaupt und somit zum Musterobjekt für weitere Untersuchungen des Ausgangszustandes des Wolkengases vor dem Einsetzen der Sternentstehung.

Aktive Sternentstehung in CB 34

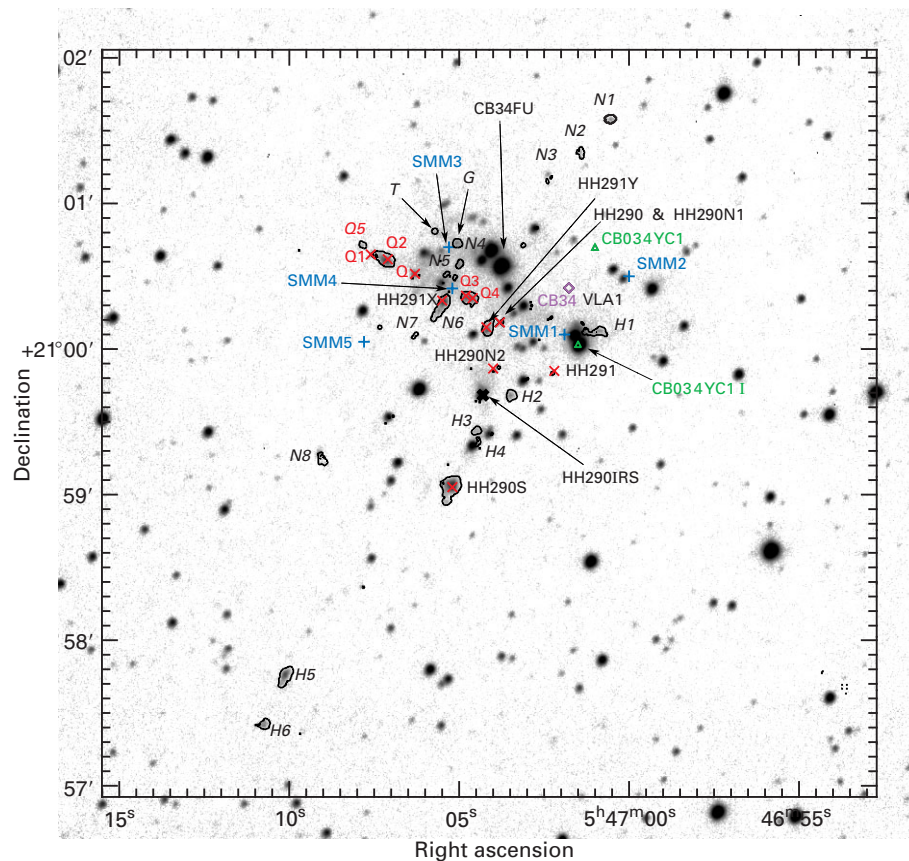
Astronomen des MPIA untersuchten gemeinsam mit Kollegen vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn sowie aus Nordirland und Hawaii die ca. 1500 pc (5000 Lj) entfernte Bok-Globule CB 34. Sie stellt in gewisser Hinsicht das genaue Gegenteil zu B 68 dar. Mit einem Durchmesser von etwa 0.75 pc (2.5 Lj) ist sie 20 mal so groß und 250 mal so massereich wie B 68. Vor allem entstehen im Innern von CB 34 viele neue Sterne, womit sich hier eine Globule im fortgeschrittenen Stadium ideal untersuchen lässt.

Die Astronomen beobachteten CB 34 im nahen Infrarot mit der am Institut gebauten Kamera Omega Prime am 3.5-Meter-Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums. Damit war es möglich, angeregten molekularen Wasserstoff

bei einer Wellenlänge von $2.12\ \mu\text{m}$ zu studieren. Er ist ein Indikator für energiereiche und turbulente Vorgänge im interstellaren Medium. Außerdem beobachteten sie die Globule in Spanien mit dem IRAM-Teleskop im Millimeterbereich. Hier liegen Linien von CO^+ und HCO^+ -Gas, aus deren Untersuchung sich die Dichteverteilung im Innern der Wolke ermitteln lässt.

CB 34 ist schon mehrfach in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen untersucht worden. Hierbei war man bereits auf angeregtes Gas, z.B. in Herbig-Haro- (HH-) Objekten, gestoßen, das auf intensive Teilchenwinde von jungen Sternen hindeutet. Die neuen, sehr tief gehenden Aufnahmen im nahen Infrarot offenbarten jetzt eine ganze Reihe bislang unbekannter H_2 -Gebiete (H-, N- und Q-Serie, Abb. IV.4). Diese markieren drei eng gebündelte Gasstrahlen, so genannte Jets, die von jungen Sternen ausgehen. Zwei dieser Jets wurden im Rahmen dieses Beobachtungsprojekts entdeckt. Das Jet-Phänomen ist seit etwa 20 Jahren bekannt. Astronomen des MPIA waren an seiner Entdeckung beteiligt und haben entscheidend zu seiner Aufklärung beigetragen. (Jahresbericht 1998, S.54) Die H_2 -Knoten der H-, N- und Q-Serie liegen jeweils auf einer Linie und markieren die gebündelten Ausströmungen (Abb. IV.5). Die H_2 -Emission entsteht wahrscheinlich in

Abb. IV.4: Das Zentralgebiet von CB 34 im Licht des molekularen Wasserstoffs, H_2 . Die mit H1 bis H6, N1 bis N6 sowie G, T und Q5 bezeichneten Kondensationen wurden neu entdeckt.



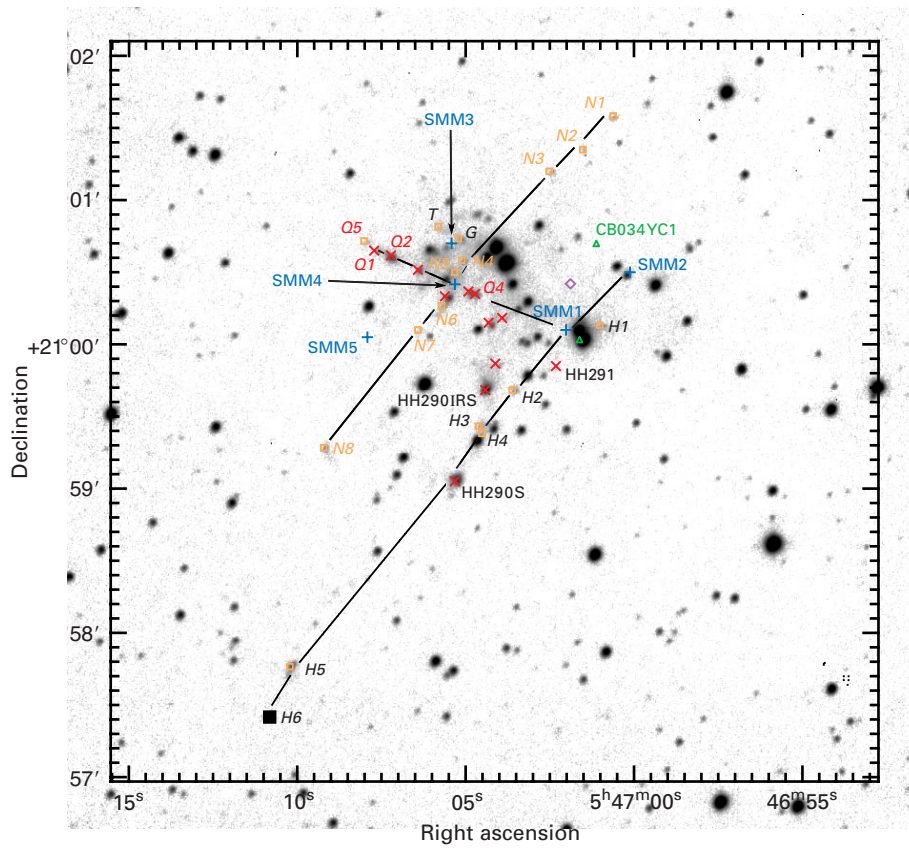
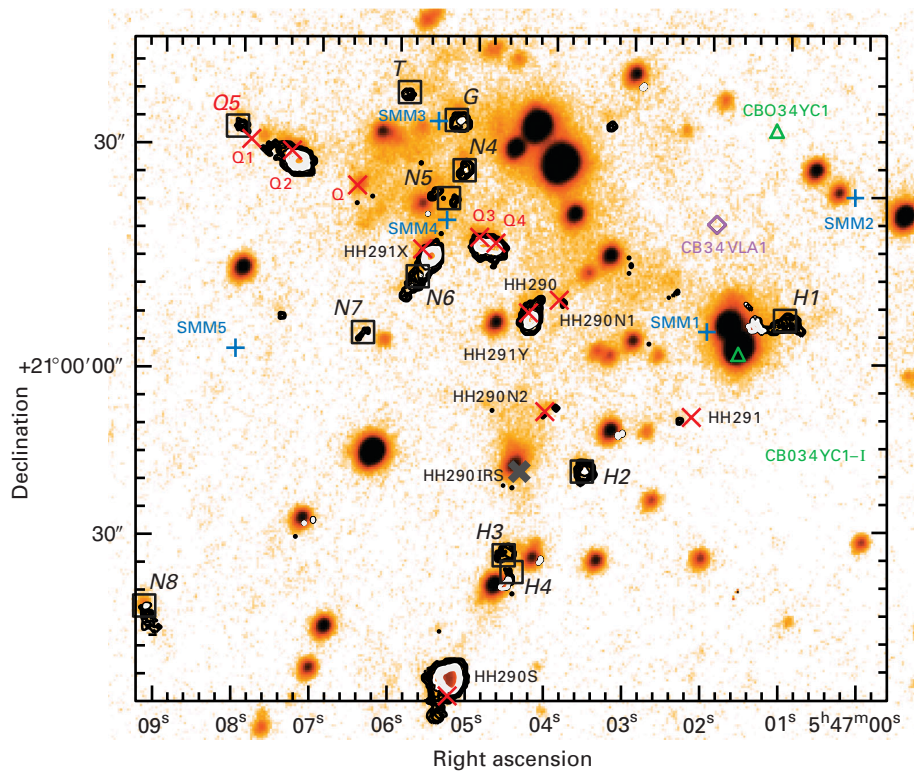


Abb. IV.5: Schematische Anordnung der H_2 -Knoten, die den Verlauf von drei Jets markieren.



Folge der Schockanregung des Gases im schnellen Teilchenstrom. Hierbei entstehen Temperaturen bis zu 3000 K, bei denen die Moleküle zur Emission bei der charakteristischen Wellenlänge von $2.12\ \mu\text{m}$ angeregt werden. Die projizierte Länge der Jets beträgt $1.6\ \text{pc}$ ($5.2\ \text{Lj}$) für H1-H6, $1.4\ \text{pc}$ ($4.6\ \text{Lj}$) für N1-N8 und $1.2\ \text{pc}$ ($3.9\ \text{Lj}$) für Q5-Q4-HH290N1. Da an den vermeintlichen Enden der Strömungen keine Kopfwellen entdeckt wurden, wie sie ansonsten für Jets typisch sind, ist anzunehmen, dass sich die Strömungen noch weiter ins interstellare Medium ausdehnen.

Nimmt man für die Jets eine typische Geschwindigkeit von $100\ \text{km/s}$ an, so kommt man auf eine (dynamische) Lebensdauer von etwa 13 000 Jahren – einen Wert, der auch bei anderen Jets gefunden wurde und für dieses Phänomen offenbar typisch ist. Die Quellen dieser Jets lassen sich nicht eindeutig erkennen. Bei den Beobachtungen im Submillimeterbereich wurden aber einige Verdichtungen im HCO^+ -Gas erkennbar, in den Abb. IV.5 und IV.6 mit SMM bezeichnet. SMM1 besitzt einen Durchmesser von zehn Bogensekunden, entsprechend $0.08\ \text{pc}$ ($0.25\ \text{Lj}$) und eine Leuchtkraft im Submillimeterbereich von 40 Sonnenleuchtkräften, SMM4 strahlt 20 Sonnenleuchtkräfte ab. Wahrscheinlich verbergen sich in diesen Kondensationen jeweils mehrere Protosterne. Zwei dieser Objekte in SMM1 sind vermutlich für den H- und den Q-Jet verantwortlich. Die Submillimeterquelle SMM4 befindet sich etwa im Zentrum des N-Jets und könnte dessen Ursprung sein. Hierfür spricht auch die Existenz des Herbig-Haro-Objekts HH291X nahe bei SMM4 (Abb. IV.6). HH-Objekte sind bekanntermaßen leuchtende, schockangeregte Gas-kondensationen innerhalb der Jets.

Seit längerem schon ist in CB 34 auch ein Ausstrom von CO-Gas bekannt. Die Verteilung des CO-Gases konnten die Astronomen mit dem IRAM-Teleskop sehr detailliert untersuchen. Hierbei fanden sie eine bipolare Struktur, in deren Zentrum die Quelle SMM1 zu sitzen scheint.

Die Vermutung, dass Sternentstehung in CB 34 in mehreren Phasen stattgefunden hat, wird durch die Infrarotbeobachtungen unterstützt. Im Zentralgebiet der Wolke wurden über 20 durch Staub gerötete Protosterne nachgewiesen. Die übrigen, weiter außen befindlichen Sterne sind offenbar älter. Dies passt auch zu den Beobachtungen des H_2 - und CO-Gases. Die unterschiedlichen von junge Sterne ausgehenden Strömungen konzentrieren sich auf den Zentralbereich der Globule, wo sie das interstellare Gas in starke Turbulenz versetzen.

Einen Hinweis auf den Zeitrahmen der gesamten Sternentstehung in dieser Globule liefert ein Hauptreihenstern mit der Bezeichnung CB34FU. Er ist etwa eine Million Jahre alt. Die Astronomen vermuten insgesamt zwei Phasen der Sternentstehung: Vor einer Million Jahre bildeten sich an vielen Stellen in der Wolke die ersten Sterne. Diese erzeugten Teilchenwinde und Schockwellen, die das Gas im Zentralteil verdichteten und eine zweite Welle der Sternentstehung auslösten. Diese Objekte sind heute die Quellen der Jets.

Die Entstehung von CB 34

Wie ist die Globule CB 34 entstanden? Etwa 15 Bogenminuten entfernt befindet sich eine weitere Globule mit der Bezeichnung CB 33. Beide Wolken sind durch diffuse Materie locker miteinander verbunden (Abb. IV.7a). Weiter entfernt befindet sich nahe der Gemini-Assoziation ein großer Wolkenkomplex mit jungen, heißen O- und B-Sternen. Es besteht die Möglichkeit, dass die beiden kleinen Globulen ursprünglich zu der großen Gemini-Wolke gehört haben. Dann müssten die Globulen allerdings mindestens zehn Millionen Jahre alt sein, was den neuesten Erkenntnissen widerspricht.

Eine andere Beobachtung lieferte aber eine mögliche Erklärung für die Entstehung der Globulen. Eine tiefe Aufnahme im nahen Infrarot, bei der das große Gesichtsfeld der OMEGA-PRIME-Kamera zum Tragen kam, offenbarte einen diffusen strahlenden Halo, der CB 34 umgibt (Abb. IV.7b). Für diese Strahlung gibt es mehrere denkbare Erklärungen, z.B. als gestreutes Licht der Protosterne oder auch als Fluoreszenzstrahlung von molekularem Wasserstoff, die durch UV-Licht eines benachbarten heißen Sterns angeregt wird. Weder diese beiden noch andere, von den Astronomen in Betracht gezogene Vorgänge kommen aber für die Halo-Emission um CB 34 und CB 33 in Betracht.

Es gibt aber noch eine andere faszinierende Möglichkeit: Wenn sich zwei Wasserstoffatome auf der Oberfläche eines Staubeilchens zu molekularem Wasserstoff vereinen, entsteht Infrarotstrahlung. Wenn im Halo der Globulen atomarer Wasserstoff mit einer Dichte von $10^4\ \text{cm}^{-3}$ vorliegt, reicht die geschätzte Entstehungsrate von moleku-

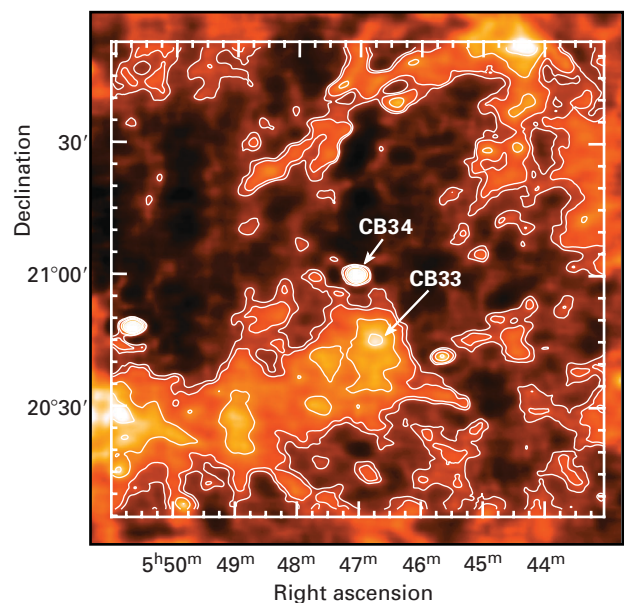


Abb. IV.7: a) Diese IRAS-Aufnahme bei $100\ \mu\text{m}$ Wellenlänge zeigt die beiden Globulen CB 34 und CB 33 (IPAC/CalTech).

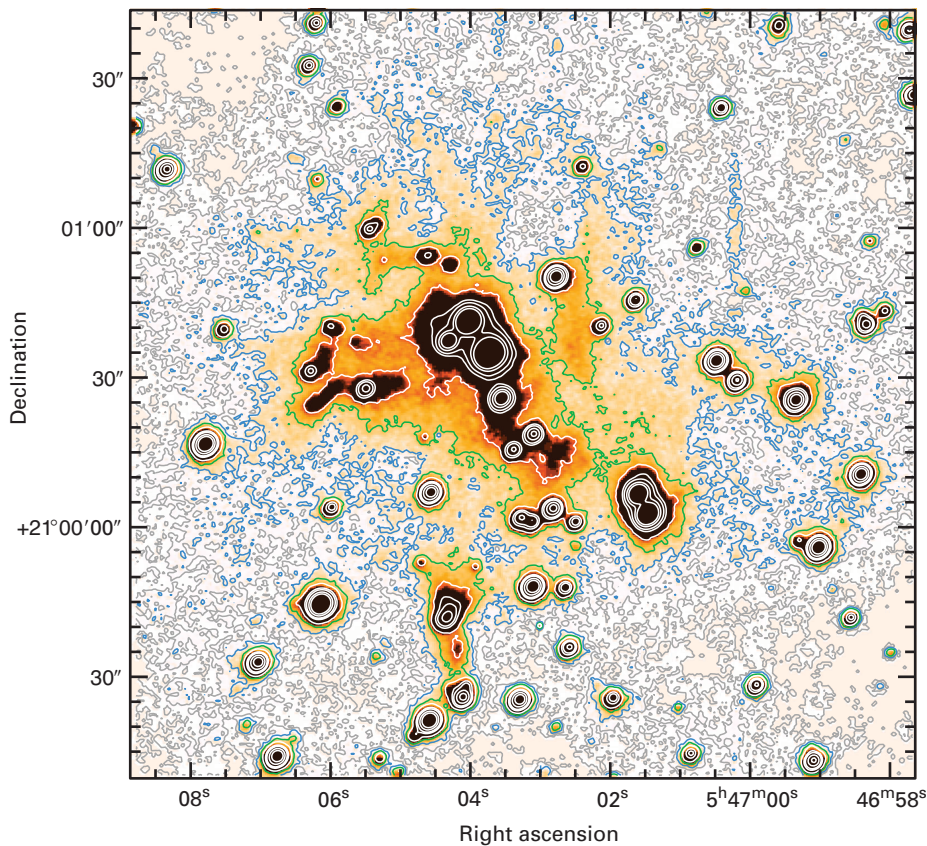


Abb. IV.7: b) In dieser mit OMEGA-PRIME gewonnenen Aufnahme wird das Halogas und seine großräumige Verteilung sichtbar. CB 34 befindet sich bei $21^{\circ}00'30''$ Deklination und $5^{\text{h}}47^{\text{m}}05^{\text{s}}$ Rektaszension.

larem Wasserstoff aus, um die beobachtete Intensität der Nahinfrarotstrahlung im Halo zu erklären. Sollte diese Interpretation richtig sein, so würde dies auf eine Entstehung der Globulen aus einer Wolke aus atomarem Wasserstoff hindeuten, die sich zusammenzog und abkühlte. Dieses Szenario wollen die Astronomen mit weiteren Beobachtungen überprüfen.

(Roland Gredel)

Interstellarer Eisstaub

Der interstellare Staub bildet mit einem Massenanteil von etwa einem Prozent den kleinsten Posten in der Summe der interstellaren Materie. Dennoch ist er bei vielen Vorgängen von entscheidender Bedeutung, insbesondere bei der Entstehung von Sternen und Planeten. Schon lange sind die Astronomen davon überzeugt, dass ein Großteil der festen Partikel im Innern dichter Staubwolken einen Kern aus Silikaten besitzt, der von einem Mantel aus gefrorenen molekularen Gasen umgeben ist. Diese Gase spielen eine zentrale Rolle bei der chemischen Entwicklung interstellarer Wolken. Ihr Nachweis ist jedoch außerordentlich schwierig. Astronomen des

Instituts ist es gemeinsam mit Kollegen der Universitätssternwarte Jena gelungen, in mehreren Wolken Ammoniak-, Methanol- und Methaneis aufzuspüren. Sie nutzen hierfür das europäische Weltraumobservatorium Iso.

Sterne und Planeten entstehen in dichten interstellaren Wolken aus Gas und Staub. In der Gasphase konnten vor allem im Radio- und Infrarotbereich rund hundert verschiedene Molekülarten nachgewiesen werden. Die Moleküle spielen eine bedeutende Rolle bei der Sternentstehung. Zum Beispiel nehmen sie sehr effizient Wärme auf, die bei der Sternbildung frei wird, und strahlen sie im langwelligen Bereich in den Weltraum ab. Auf diese Weise kühlen sie heiße Gebiete ab und ermöglichen damit die weitere Kontraktion der Materie, die letztlich zur Bildung von Sternen und Planeten führt.

Das Kern-Mantel-Modell für Staubteilchen

Die große Vielfalt an Molekülen, von denen einige aus mehr als zehn Atomen bestehen, deutet auf ein kompliziertes Netz chemischer Reaktionen im Innern der Staub- und Molekülwolken hin. Die Oberflächen winziger Staubteilchen spielen hierbei eine zentrale Rolle. Sie dienen gewissermaßen als Katalysatoren für viele chemische Reaktionen. Das häufigste Molekül in der Gasphase ist molekularer Wasserstoff (H_2). Er entsteht jedoch nicht durch Anlagerung von zwei Wasserstoffatomen im freien Raum. Hierbei muss das neu entstandene Molekül nämlich Energie abgeben, was ihm bei den extremen Bedingungen in den Molekülwolken (geringe Teilchendichte und tiefe Temperaturen) nicht möglich ist. Hier kommt der interstellare Staub ins Spiel.

Wasserstoffatome können sich auf den Oberflächen der Partikel ablagern und auf ihnen umherwandern. Treffen sie dabei auf ein anderes H-Atom, so können sie sich zu einem H_2 -Molekül vereinigen. Die hierbei frei werdende Reaktionswärme wird zum Teil an das Staubteilchen abgegeben. Ein anderer Teil der Wärme kann jedoch in Bewegungsenergie umgesetzt werden, die es dem Molekül ermöglicht, sich vom Staub abzulösen und in die Gasphase zu gelangen.

Auch bei anderen Elementen, wie Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff, spielt der Staub eine bedeutende Rolle. Diese Elemente bilden schon in der Gasphase kleinere Moleküle, wie Kohlenmonoxid (CO) und Ammoniak (NH_3). Sie können bei den Reaktionen sehr tief im Innern der Staubwolken auf den Oberflächen der Staubpartikel ausfrieren und dort größere Moleküle bilden, deren Entstehung in der Gasphase sehr unwahrscheinlich wäre.

Tatsächlich müssten bei Temperaturen um 10 K innerhalb einiger zehn- bis hunderttausend Jahre alle Gase komplett auf den Teilchen ausgefroren sein. Die Tatsache, dass man sie dennoch in der Gasphase nachweist, deutet daher darauf hin, dass auch ständig Moleküle von den Oberflächen der Staubteilchen abdampfen. Die Energie hierzu liefert zum Beispiel UV-Strahlung junger, heißer Sterne.

Diese Beobachtungsfakten und theoretischen Überlegungen legen für die Struktur der Staubteilchen ein Kern-Mantel-Modell nahe. Demnach besteht ein typisches Staubkorn aus einem Kern aus Silikaten und Kohlenstoffverbindungen, der von einem Eismantel umgeben ist. Letzterer resultiert aus einem Gleichgewicht zwischen abdampfenden und ausfrierenden Molekülen.

Während sich im Innern der Staubwolken die Moleküle in der Gasphase verhältnismäßig leicht nachweisen lassen, steckt die Beobachtung der Eise auf den Partikeln noch in den Kinderschuhen. Die Eise lassen sich über ihre chemischen „Fingerabdrücke“ nachweisen. Werden die im Eiskristall gebundenen Moleküle elektromagnetischer Strahlung ausgesetzt, dann werden durch Absorption von Strahlung bestimmter Energiebereiche Biege-, Streck- und Inversionsschwingungen der atomaren Komponenten ausgelöst, die zu einer Schwächung der Strahlung im entspre-

chenden Wellenlängenbereich führen – man beobachtet eine typische Absorptionsbande. Die primäre Strahlung stammt von jungen tief in die Staubwolken eingebetteten Sternen.

Nur die häufigsten Verbindungen, H_2O , CO und seit den ISO-Beobachtungen auch CO_2 , ließen sich bislang eindeutig identifizieren. Die wichtigsten Absorptionsbanden der Eismoleküle liegen im Infrarotbereich, wo Spektroskopie vom Erdboden aus aufgrund der Absorption durch atmosphärischen Wasserdampf nur in eingeschränkten Wellenlängenbereichen möglich ist. Die Molekülbanden unterschiedlicher Stoffe können sich überlagern, was die Identifizierung erschwert. Um die Absorptionsbanden überhaupt einem Molekül zuordnen zu können, muss deren Wellenlänge durch Laborexperimente bestimmt werden. Messungen dieser Art sind diffizil und können nur in wenigen Labors, z.B. dem an der Universität Leiden, durchgeführt werden.

Nachweis von Eisstaub mit ISOPHOT

Das europäische Infrarotobservatorium ISO brachte die Untersuchung der chemischen Zusammensetzung von Staubteilchen einen großen Schritt voran. Es besaß mehrere Spektrometer an Bord, mit denen der für die Untersuchung der Eise wesentliche Wellenlängenbereich lückenlos zugänglich war, und die auch die notwendige Empfindlichkeit aufwiesen. Eines der Spektrometer war der speziell für Staubuntersuchungen entworfene Spektrometerkanal des Instruments ISOPHOT, das unter der Leitung des MPIA entwickelt und gebaut worden war. Er verfügte über zwei Gitterspektrographen, die den Wellenlängenbereich von $2.5\ \mu m$ bis $4.9\ \mu m$ bzw. von $5.8\ \mu m$ bis $11.6\ \mu m$ abdeckten.

Mit diesem Instrument hatten schon 1996 Astronomen der Universitätssternwarte Jena und des MPIA in zwei Molekülwolken neben Wassereis auch erstmals eisförmiges CO_2 nachweisen können. Neben der niedrig aufgelösten Spektroskopie mit ISOPHOT war mit dem Short Wavelength Spectrometer (SWS, ebenfalls auf ISO) zum ersten Mal hoch aufgelöste Spektroskopie von $2.4\ \mu m$ bis $45\ \mu m$ Wellenlänge möglich. Dieses Instrument war jedoch für lichtschwache Objekte nicht empfindlich genug, und es erforderte deutlich längere Belichtungszeiten als ISOPHOT, so dass mit SWS letztlich weniger Objekte untersucht werden konnten.

Die Astronomen der Universitätssternwarte Jena arbeiteten jetzt mit ihren Kollegen vom MPIA zusammen, um auch festes Ammoniak (NH_3), Methan (CH_4) und Methanol (CH_3OH) nachzuweisen. Ammoniak nimmt in dem chemischen Netzwerk eine bedeutende Stellung ein, weil es als zentrales Ausgangsmaterial für komplexere Stickstoffverbindungen gilt. Obwohl es bei Temperaturen um 195 K ausfrieren sollte, ließ es sich als Eis bislang nicht eindeutig nachweisen. Für seine jüngste Analyse nutzte das Team sowohl Daten des Spektrophotometers ISOPHOT als

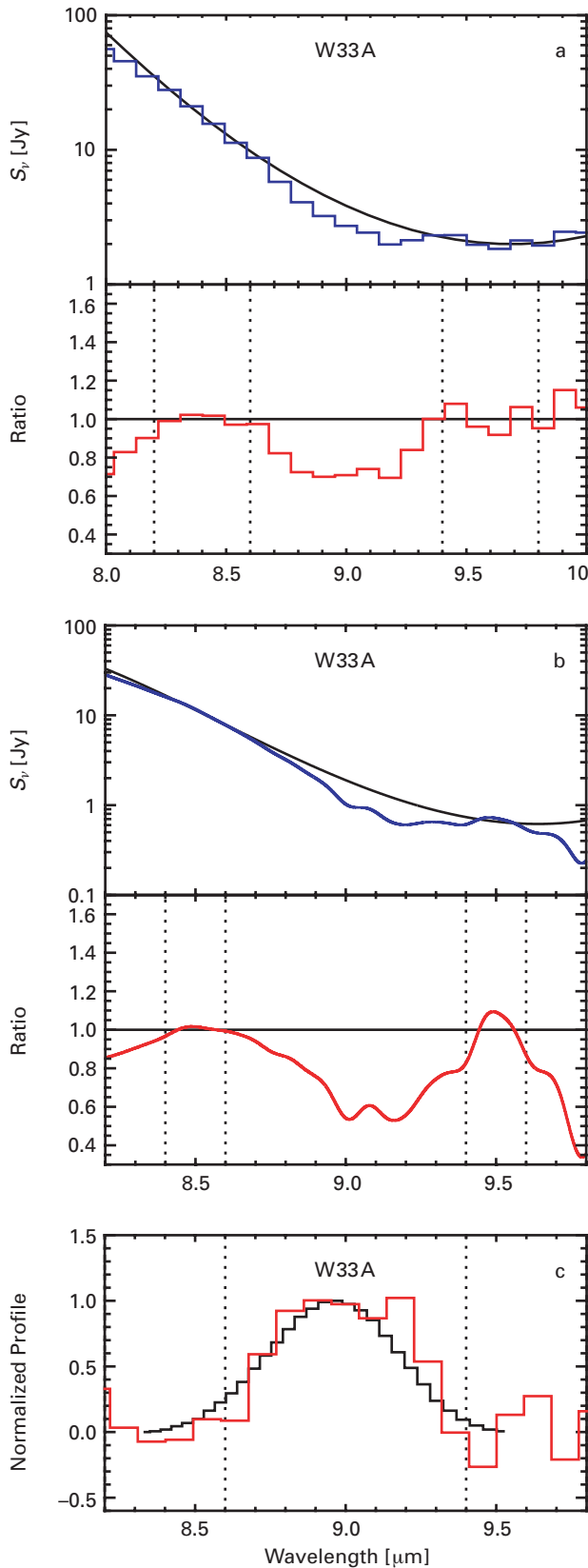


Abb. IV.8: Spektrum der Dunkelwolke W33A, aufgenommen (a) mit ISOPHOT und (b) mit SWS. Der starke Abfall zu längeren Wellenlängen hin wird durch die tiefe Silikatabsorption verursacht. Das obere Bild zeigt die Anpassung des Polynoms, das untere das Verhältnis aus gemessenem Spektrum und Polynom-

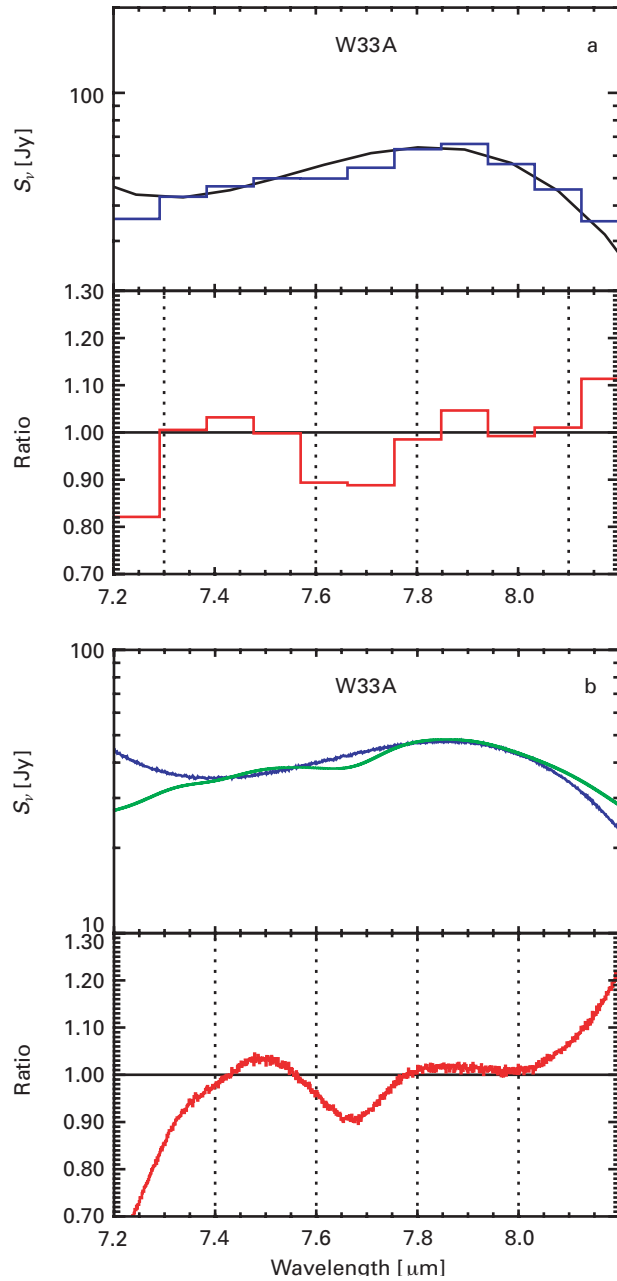


Abb. IV.9: Spektren von W33A im Bereich der CH_4 -Absorption um $7.7 \mu\text{m}$ Wellenlänge, aufgenommen (a) mit ISOPHOT und (b) mit SWS.

anpassung. Deutlich tritt die NH_3 -Absorption um $9.0 \mu\text{m}$ Wellenlänge hervor. Die Paare gestrichelter senkrechter Linien deuten die Bereiche an, in denen die Polynomkoeffizienten bestimmt werden. (c) Ein Vergleich des auf das Minimum normierten Profils mit einem Laborspektrum.



auch des Short Wavelength Spectrometer, um das Auswerteverfahren an den Daten zweier unabhängig geeicherter Instrumente überprüfen zu können.

Insgesamt lagen für zehn Staubwolken, in denen sich junge Sterne befinden, von beiden Instrumenten Messergebnisse vor. Ein Vergleich der beiden Datensätze brachte für jedes einzelne Objekt eine gute Übereinstimmung. Geringfügige Abweichungen ließen sich darauf zurückführen, dass die Eintrittspalte der beiden Instrumente nicht genau gleich groß waren und somit auch etwas unterschiedlich große Himmelsgebiete spektroskopiert wurden.

Festes Ammoniak (NH_3) weist im Infraroten drei starke Molekülbanden auf: bei $2.95\ \mu\text{m}$, $6.16\ \mu\text{m}$ und $9.0\ \mu\text{m}$ Wellenlänge. Bisherige Versuche, das Molekül nachzuweisen, konzentrierten sich auf die kürzeste Wellenlänge. Hier trat jedoch das Problem auf, dass diese charakteristische Signatur von einer Wassereisbande überlagert wird.

Die Astronomen des MPIA suchten in ihren Daten nach der NH_3 -Absorption bei $9.0\ \mu\text{m}$. Laboruntersuchungen sagen eine Absorption voraus, die sich von $8.6\ \mu\text{m}$ bis $9.4\ \mu\text{m}$ erstreckt und ein Maximum bei $9.0\ \mu\text{m}$ zeigt. Um diese zu isolieren, musste eine überlagerte Absorption der Silikatteilchen abgezogen werden. Diese Absorptionsbande ist wesentlich stärker und erstreckt sich auch über den breiteren Wellenlängenbereich von $8.0\ \mu\text{m}$ bis $12.0\ \mu\text{m}$. Hierfür gibt es kein Standardverfahren, weil das Profil der Silikatlinie abhängig von den lokalen Umgebungsbedingungen variiert. Zudem liegen keine Labordaten vor, mit deren Hilfe man diese Bande modellieren könnte. In den vor-

Abb. IV.10: Cep A, eine der untersuchten Molekülwolken, aufgenommen im nahen Infrarot. (Bild: 2MASS)

liegenden Daten wurde daher die Silikatabsorption im Bereich der NH_3 -Absorption von $8.6\ \mu\text{m}$ bis $9.4\ \mu\text{m}$ durch ein Polynom angepasst. Dessen Koeffizienten wurden anhand des spektralen Verlaufs in den benachbarten Wellenlängenbereichen ($8.2\ \mu\text{m}$ bis $8.6\ \mu\text{m}$ bzw. $9.4\ \mu\text{m}$ bis $9.8\ \mu\text{m}$), der nur durch das Silikatprofil bestimmt wird, festgelegt. Das gemessene Spektrum wurde zu diesem interpolierten Silikatprofil ins Verhältnis gesetzt.

Nach dieser Prozedur zeigte sich bei vier Objekten die gesuchte Linie des Ammoniaks sowohl in den ISOPHOT- als auch in den SWS-Daten. Am prominentesten tritt die Linie in der Dunkelwolke W33A hervor (Abb. IV.8). Dies ist eine Dunkelwolke mit einem eingebetteten jungen Stern. W33A ist das 33. Objekt in einer Liste von 82 hellen Radioquellen, die 1957 der niederländischen Astronom G. Westerhout erstellte. A bezeichnet eine Unterstruktur, die später mit höherer räumlicher Auflösung gefunden wurde.

Nach dem selben Verfahren suchten die Astronomen nach den spektralen Signaturen von Methan (CH_4) und Methanol (CH_3OH). Für CH_4 erwartet man eine Absorption bei $7.7\ \mu\text{m}$. Ein deutlicher Nachweis ergab sich erneut in W33A (Abb. IV.9) und in NGC 7538 IRS9 sowie andeutungsweise in zwei anderen Wolken, mit den Bezeichnungen AFGL 2591 und Cep A (Abb. IV.10). Die Signatur von CH_3OH bei $9.7\ \mu\text{m}$ fanden die Forscher ebenfalls in

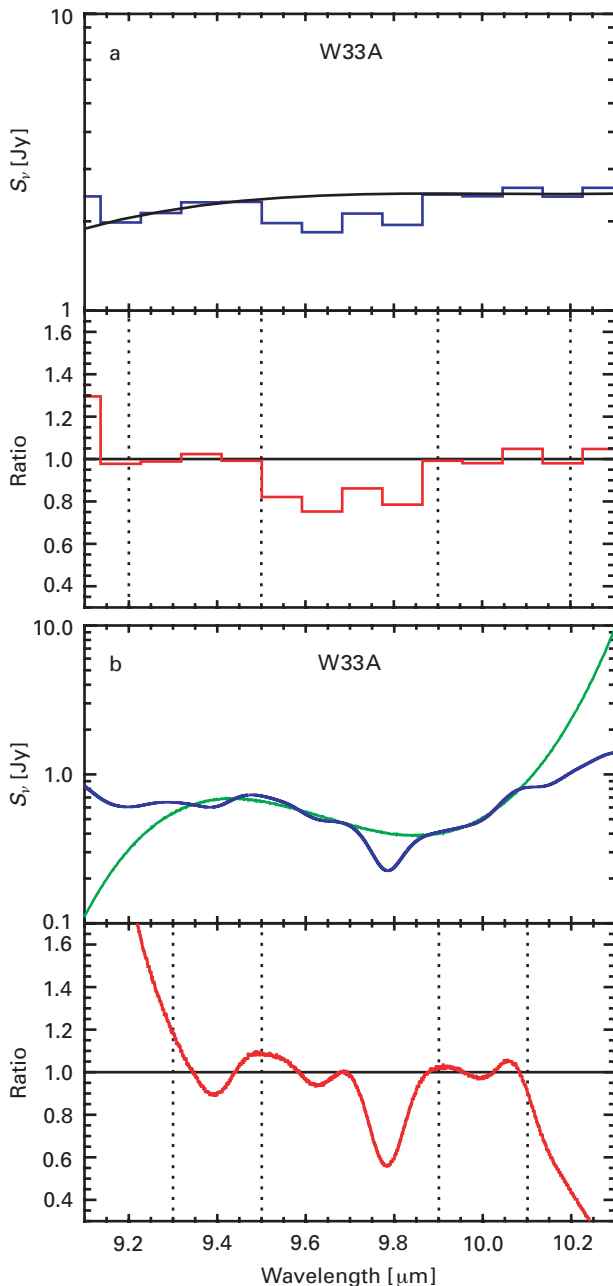


Abb. IV.11: Spektren von W33A im Bereich der CH_3OH -Absorption um $9.7\ \mu\text{m}$ Wellenlänge, aufgenommen **(a)** mit ISO-PHOT und **(b)** mit SWS.

W33A (Abb. IV.11) und in Cep A sowie in einem weiteren Objekt.

Im Spektrum von W33A ist auch die Linie von Wassereis stark ausgeprägt. Aus der Stärke der Linien lässt sich das Häufigkeitsverhältnis der Stoffe ermitteln. Die Analyse zeigte, dass etwa 10 – 20 % NH_3 im Verhältnis zu H_2O vorhanden ist. Dieses Ergebnis stimmt mit Spektralanalysen ähnlich zusammengesetzter Eisteilchen im Labor überein. Andere Forschergruppen hatten für W33A bereits ermittelt, dass CO_2 und CO relativ zu H_2O jeweils rund 10 % ausmachen. Damit stehen zumindest für dieses Sternentstehungsgebiet recht robuste Werte zur Verfügung. Sie

dienen nun als wichtige Größen zum weiteren Verständnis der Vorgänge während der Sternentstehung.

Damit konnte die Forschergruppe zeigen, dass die spektrale Auflösung des Spektrophotometers auf ISO-PHOT ausreicht, um die charakteristischen Banden von interstellaren Eisen zu identifizieren. Die Astronomen werden nun ihre neu entwickelte Methode auf weitere Staubwolken anwenden, deren Messdaten im ISO-Archiv gespeichert sind.

(U. Klaas, D. Lemke)

Entstehung von Doppelsternen: neue Antworten und neue Fragen

Die meisten Sterne gehören Doppel- oder Mehrfachsystemen an. Bei G-Sternen – zu denen auch die Sonne gehört – in der Sonnenumgebung beispielsweise beträgt das Verhältnis von Einfach- zu Doppel- zu Dreifach- und Vierfachsystemen 57 : 38 : 4 : 1, das heißt, nicht einmal 40 % aller Sterne sind „Einzelgänger“. Es spricht heute alles dafür, dass sich die Mehrfachsysteme bereits in der Entstehungsphase der Sterne bilden. Es liegt daher nahe, dass physikalische Größen, wie die Verteilung der Umlaufperioden oder die Massenverhältnisse der Sterne Informationen über den Prozess der Sternentstehung enthalten. In einer theoretischen und einer beobachtenden Studie haben Astronomen des Instituts diese Größen analysiert.

Die Entstehung und Entwicklung von Doppelsternsystemen sowie deren Eigenschaften sind am MPIA in den vergangenen Jahren in vielfältiger Weise untersucht worden. Dies betrifft sowohl numerische Simulationen (Jahresbericht 1997, S. 59) als auch hoch auflösende Beobachtungen (Jahresbericht 1998, S. 47). Letztere führten zu der zunächst überraschenden Erkenntnis, dass der Anteil an Mehrfachsystemen in den Sternentstehungsgebieten in Taurus-Auriga und Lupus wesentlich höher ist als bei Hauptreihensternen. Astronomen des MPIA konnten nachweisen, dass in Taurus-Auriga rund doppelt so viele junge Sterne an einen oder mehrere Partner gebunden sind als im späteren Hauptreihenstadium. Eine denkbare Erklärung hierfür ist, dass die jungen Mehrfachsysteme sich bei nahen Begegnungen durch die Schwerkraft gegenseitig Mitgliedssterne entreißen. Die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Vorgang ist bei jungen Sternen höher als bei alten, weil sie anfänglich in ihrer „Geburtswolke“ näher beieinander sind als später. Darüber hinaus besteht die Vermutung, dass physikalische Bedingungen während der Sternentstehung, wie die Temperatur der umgebenden interstellaren Wolke, bei der Anzahl der entstehenden Mehrfachsysteme eine Rolle spielen.

Astronomen des MPIA führten im Berichtsjahr gemeinsam mit Kollegen von der Thüringer Landessternwarte Tautenburg Speckle-Infrarotbeobachtungen durch, um die Massen und Massenverhältnisse der Mitglieder junger

Doppelsternsysteme zu ermitteln. Ziel war es, die Ergebnisse mit numerischen Modellrechnungen zu vergleichen.

Mit der am MPIA gebauten Infrarotkamera MAGIC wurden am 3.5-Meter-Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums junge Sterne im Sternentstehungsgebiet in Taurus-Auriga beobachtet. Hinzu kamen Beobachtungen in am Südhimmel gelegenen Sternentstehungsgebieten mit dem New Technology Telescope der ESO auf La Silla, Chile. Da in den meisten jungen Doppelsternsystemen die einzelnen Sterne weniger als eine Bogensekunde voneinander entfernt sind, war der Einsatz der hoch auflösenden Speckle-Technik nötig. Hierbei wurden typischerweise tausend Einzelbilder mit jeweils 0.1 Sekunden aufgenommen und anschließend zu einer Gesamtaufnahme überlagert. Dadurch gelingt es, die Verschmierung der Aufnahmen durch die Luftunruhe (das „Seeing“) zu überwinden. Die Messungen wurden bei $2.2\ \mu\text{m}$ Wellenlänge vorgenommen, wo auch Sterne erkennbar sind, deren sichtbares Licht durch Staubextinktion stark geschwächt ist.

Die gesamte Gruppe umfasste 119 Sterne mit projizierten Abständen der Sterne in Doppelssystemen von mindestens 20 AE. Die Sternentstehungsgebiete sind 450 Lj (Taurus-Auriga) bis 620 Lj (Lupus) entfernt. Für alle Objekte waren räumlich aufgelöste, photometrische Messungen in drei Wellenlängenbereichen des nahen Infrarot möglich.

Bevor die Beobachtungsdaten ausgewertet werden konnten, mussten sie „entrötet“ werden, das heißt, die Ex-

tinktionswirkung des interstellaren Staubes wurde korrigiert. Anschließend trugen die Astronomen die Messdaten in ein Farben-Helligkeits-Diagramm mit theoretisch berechneten Entwicklungswegen ein. Hierbei fielen einige Systeme aus dem theoretisch möglichen Bereich heraus (Abb. IV.12). Ursache hierfür ist wahrscheinlich die Existenz stellarer Staubscheiben oder Staubhüllen, wie sie häufig bei jungen Sternen vorkommen. Sie verursachen eine zusätzliche, starke Extinktion, die sich nicht korrigieren ließ. Diese Sterne wurden deshalb bei der weiteren Analyse nicht berücksichtigt.

Von den verbliebenen Sternen wurden die Leuchtkräfte und Spektraltypen bestimmt. Letztere Größe ist besonders schwierig zu ermitteln, da Spektren lediglich vom gesamten Licht der jeweiligen Doppelsysteme vorliegen, nicht jedoch von den einzelnen Komponenten. Die Astronomen machten daher die Annahme, dass die jeweilige optische Hauptkomponente das Spektrum dominiert. Unter dieser Voraussetzung und mit der weiteren sehr plausiblen Annahme, dass die beiden Sterne eines Doppelsystems gleich alt sind, ließen sich dann auch die Spektraltypen der Begleitsterne ermitteln.

Mit diesen Daten war es möglich, die Sterne in ein Hertzsprung-Russell-Diagramm mit theoretischen Entwicklungswegen einzutragen und die Einzelmassen zu bestimmen. Das Ergebnis ist leider noch sehr stark von dem verwendeten Entwicklungsmodell für Vorhauptreihensterne abhängig. Zum anderen ist die Sterngruppe unterhalb von etwa 0.5 Sonnenmassen unvollständig. Aus die-

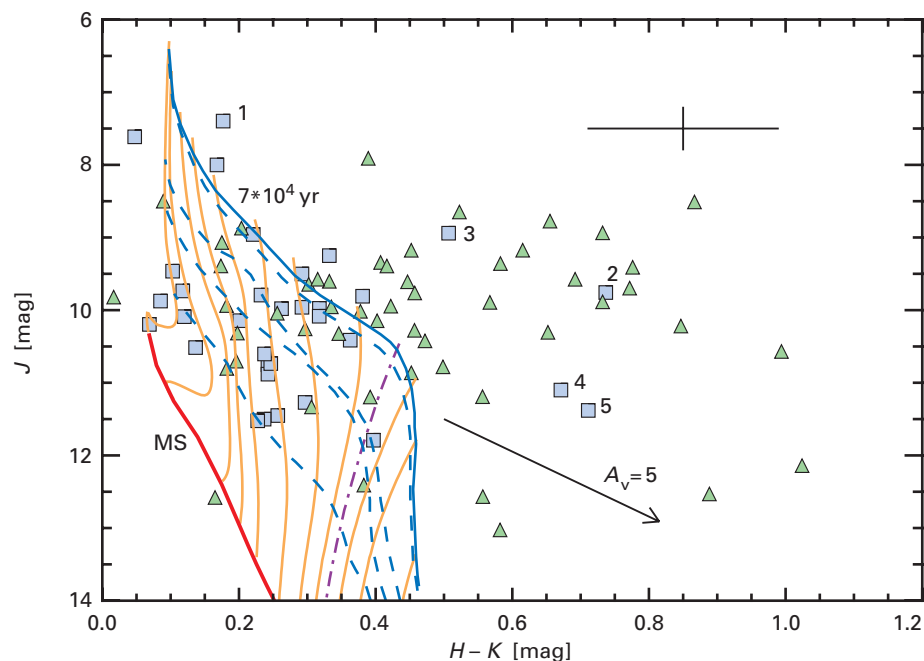


Abb. IV.12: Farben-Helligkeits-Diagramm der Einzelkomponenten und berechnete Entwicklungswegen für Sterne unterschiedlicher Masse. Theoretisch sind nur Positionen zwischen den beiden dicken, durchgezogenen Linien möglich. Sterne

außerhalb dieses Bereichs sind wahrscheinlich von dichten Scheiben oder Hüllen aus Staub und Gas umgeben, die das Licht stark röteten.

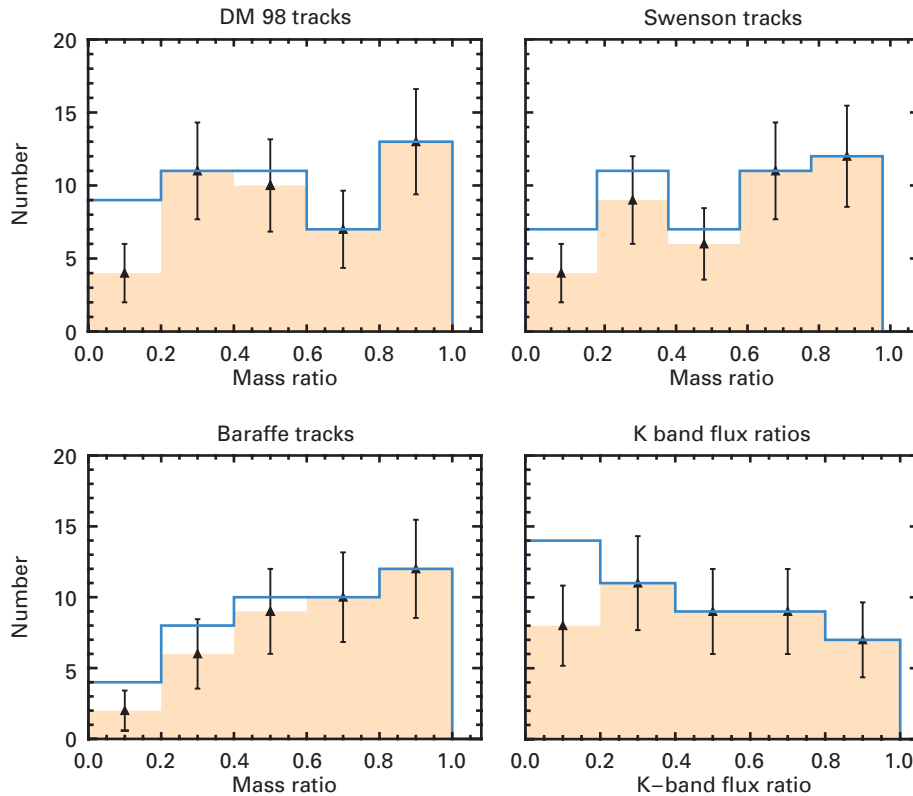


Abb. IV.13: Massenverhältnisse der Komponenten in den Doppelsternen. Die Histogramme beruhen auf drei unterschiedlichen Sternentwicklungsmodellen, mit denen die Massen berechnet werden.

sen Gründen ließ sich nicht entscheiden, wo die Massenverteilung der Einzelsterne ihr Maximum hat und wie sie sich die Massenverteilung zu substellaren Objekten hin fortsetzt.

Bei dem beabsichtigten Vergleich mit den Vorhersagen numerischer Modelle der Entstehung von Doppelsternen ist aber vor allem das Massenverhältnis der beiden Komponenten eine bedeutende Größe. Solche Modelle hatten vor wenigen Jahren ergeben, dass die beiden Komponenten eines jungen Doppelsternsystems während ihrer Entstehung weiter Materie aus der Umgebung aufsammeln. Als Folge hiervon sollte sich das Massenverhältnis der beiden Komponenten dem Wert eins annähern. Wie Abb. IV.13 zeigt, scheint es jedoch keine Bevorzugung von Doppelsternen mit gleich schweren Komponenten zu geben. Zur Aufklärung dieses Widerspruchs sind weitere Beobachtungen erforderlich. Wesentlich wird aber der Fortschritt davon abhängen, ob es gelingt, zuverlässigere Modelle für die Entwicklung von Vorhauptreihensternen und Doppelsternsystemen zu erstellen.

Entwicklung der Umlaufperioden

Neben dem Massenverhältnis gehört auch die Umlaufperiode zu den wesentlichen charakteristischen Größen von Doppelsternsystemen. Bei Doppelsternen auf der Hauptreihe liegen die perioden in einem sehr großen Bereich zwischen etwa einem Tag und tausend Jahren. Diese breite Verteilung ist erstaunlich, da Doppelsterne aus Gaswolken mit sehr ähnlichen Radien und Massen entstehen. Die charakteristischen Eigenschaften der Doppelsterne sollten dann ebenfalls nur eine geringe Streuung aufweisen.

Theoretiker am Institut haben sich die Frage gestellt, ob sich diese sehr breite Verteilung bereits bei der Entstehung der Doppelsterne einstellt, oder ob sie durch spätere Einflüsse entsteht. Denkbar wäre es, dass die Schwerkraftwechselwirkung bei der nahen Begegnung von Proto-Doppelsternsystemen im Innern der Staubwolke eine anfänglich schmale Periodenverteilung verbreitert. Dieser Verdacht war aufgekommen, weil in numerischen Simulationen der Entstehung von Doppelsternsystemen die breite Verteilung, wie erwartet, nicht entsteht. Insbesondere bilden sich bei diesen Rechnungen keine Systeme mit Perioden von weniger als etwa tausend Tagen. Dies war der Anlass, mit Hilfe von N-Körper-Rechnungen den Einfluss der Gravitation auf die Umlaufperioden in einem Sternhaufen zu simulieren.

In vier unterschiedlichen Modellen wurden hundert bzw. tausend Doppelsysteme berücksichtigt. Die Modelle

unterschieden sich vor allem in der anfänglichen Dichte. Sie reichte von einem bis zu neun Sternen pro Kubikparsek. Die Systeme wurden entsprechend der stellaren Massenfunktion zufällig mit ihren Komponenten besetzt. In drei Modellen besaßen die Sterne Massen zwischen 0.1 und 50 Sonnenmassen, in einem gab es nur massearme Sterne mit 0.08 bis 1.1 Sonnenmassen. Die Perioden waren anfänglich gleichmäßig zwischen 90 und 900 Jahren verteilt. Die Exzentrizität betrug bei allen Systemen 0.75; wie sich später zeigte, hatte dieser Wert jedoch keinen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis.

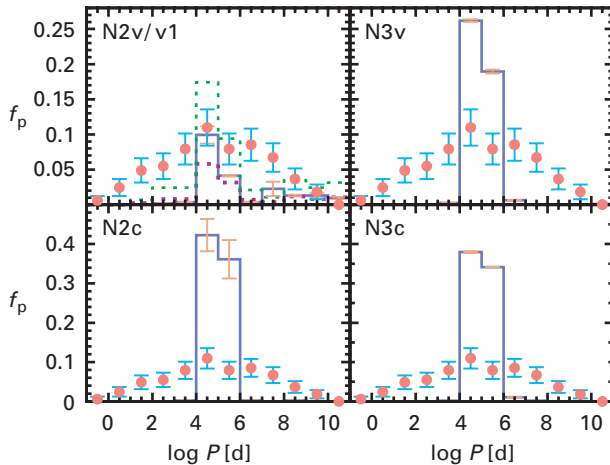


Abb. IV.14: Verteilungen der Umlaufperioden am Ende der vier Simulationen: Die theoretischen Verteilungen (Histogramme) sind wesentlich schmäler als die beobachteten (gepunktet).

Dann überließ man die Modelle dem Einfluss der Gravitation und verfolgte ihre weitere Entwicklung. Im Laufe der Zeit wurden einige Systeme, vorwiegend die weiten, zerrissen, in einigen Fällen wurden sogar Mitglieder ausgetauscht. Insgesamt verbreiterte sich die Verteilung der Umlaufperioden als Folge der gravitativen Wechselwirkungen. In keinem der Modelle stellte sich jedoch eine auch nur annähernd so breite Verteilung ein wie in der Natur beobachtet (Abb. IV.14). Das Gleiche trifft auch auf die Exzentrizitäten zu.

Demnach zeigen diese Simulationen, dass die breite Verteilung der Umlaufperioden bereits bei der Entstehung der Doppelsterne angelegt ist. Es wird nun Aufgabe der Theoretiker sein, die Ursachen für dieses Phänomen herauszufinden.

(Ch. Leinert, T. Herbst, A. Burkert)

Die frühe chemische Entwicklung des Milchstraßensystems

Die ältesten Sterne im Halo des Milchstraßensystems enthalten wesentlich geringere Anteile an schweren Elementen als unsere Sonne. Hierin spiegelt sich die chemische Entwicklung unserer Galaxis wider, deren interstellares Medium im Laufe von Jahrmilliarden mit schweren Elementen angereichert wurde. Erstaunlicherweise variiert jedoch die Häufigkeit unterschiedlicher Elemente innerhalb der Population alter Sterne ganz erheblich. Die Theoriegruppe am Institut hat in einem Modell die inhomogene chemische Anreicherung des interstellaren Mediums simuliert und mit den Beobachtungsdaten verglichen. Hierbei kam sie zu interessanten Voraussagen, die sich anhand weiterer Beobachtungen überprüfen lassen.

Die einfachsten Modelle der Entstehung und Entwicklung unserer Galaxis sagen einen Trend der Häufigkeiten schwerer Elemente (in der Astronomie als „Metalle“ bezeichnet) voraus. Demnach entstand die Galaxis aus Materie, die fast ausschließlich aus Wasserstoff und Helium bestand. Diese Wolke zog sich langsam zusammen und erste Sterne entstanden. Massereiche Sterne produzierten in ihrem Innern die ersten schweren Elemente und gaben diese durch Sternwinde oder bei Supernova-Explosionen an das interstellare Medium ab. Währenddessen kollabiert die Wolke weiter, und es bildete sich die galaktische Scheibe aus. Die interstellare Materie, aus der hier die neue Sternengeneration entstand, war dann bereits mit schweren Elementen angereichert. Damit ist der Metallgehalt eines Sterns ein Maß für das Alter und den Entwicklungszustand der Galaxis.

Wäre dieses einfache Szenario richtig, so müsste es einen Gradienten geben derart, dass der Anteil schwerer Elemente in den Sternen innerhalb des Milchstraßensystems von außen nach innen, also vom Halo zum Zentrum hin, zunimmt.

Dass sich die Entwicklung des Milchstraßensystems so einfach nicht abgespielt haben kann, belegen heute viele Beobachtungsergebnisse. Deshalb geht man heute von einem hierarchischen Entstehungsvorgang großer Scheibengalaxien aus. In diesem Bild entstand die Galaxis nicht aus einer großen Wolke, sondern wuchs im Laufe von Jahrmilliarden heran, indem mehrere kleinere Protogalaxien miteinander verschmolzen.

Generell müssen Inhomogenitäten im interstellaren Medium eine bedeutende Rolle gespielt haben. Dies belegen spektroskopische Beobachtungen von alten Sternen im Halo des Milchstraßensystems, wobei als Maß für das Alter die Eisenhäufigkeit in den Sternatmosphären gilt. Hierbei hat sich herausgestellt, dass in sehr alten Sternen mit etwa demselben, sehr geringen Eisengehalt die Anteile anderer schwerer Elemente, wie Europium, Barium und Strontium, erheblich schwanken. Ein Extremfall ist der Stern mit der

Bezeichnung CS 22892-052. Während sein Eisengehalt nur etwa ein Tausendstel des solaren Wertes beträgt, ist der Anteil einiger anderer schwerer Elemente 40 mal so groß wie in der Sonne. Diese Erkenntnisse lassen sich nur so deuten, dass das interstellare Gas in dem noch jungen Milchstraßensystem inhomogen mit schweren Elementen angereichert gewesen sein muss.

Ein Modell der chemischen und dynamischen Entwicklung des Halos

Es hat zahlreiche Versuche gegeben, eine inhomogene chemische Entwicklung des Milchstraßensystems zu simulieren. Hierbei geht man davon aus, dass Sterne ihre Umgebung lokal mit schweren Elementen angereichert haben, und dass sich diese kleineren Bereiche nur langsam durchmischt haben. Dieser Mischungsprozess lässt sich nur schwer simulieren, weil man gleichzeitig zahlreiche andere dynamische Prozesse berücksichtigen muss. Theoretiker am Institut haben zusammen mit Kollegen vom Observatorium Arcetri, Florenz, ein chemodynamisches Modell der jungen Galaxis berechnet, das eine Reihe wesentlicher Vorgänge berücksichtigt.

Das Modell beginnt mit Gaswolken unterschiedlicher Größe. Diese sind anfänglich sphärisch und in sich chemisch homogen. Im Innern können episodenhaft Sterne entstehen. Da diese später schwere Elemente an ihre Umgebung abgeben, ändert sich die chemische Zusammensetzung des Wolkengases mit der Zeit. Gleichzeitig bewegen sich diese Wolken unter dem Einfluss der Schwerkraft und sinken zum Teil in die galaktische Scheibe ab. Außerdem können sie sowohl miteinander verschmelzen als auch in Fragmente zerfallen. Dadurch verändert sich die ursprüngliche Größen- bzw. Massenverteilung der Wolken. Das Häufigkeitsverhältnis von zerfallenden zu verschmelzenden Wolken mit Sternentstehung ergibt sich nicht aus dem Modell selbst, sondern ist ein freier Parameter. Es wurden verschiedene Fälle simuliert und die Anzahl der hierbei entstehenden G-Sterne mit der beobachteten Population im Halo verglichen. Die beste Übereinstimmung ergab sich mit der Annahme, dass im zeitlichen Mittel die Verschmelzungsrate doppelt so groß ist wie die Fragmentierungsrate. Dieser Wert wurde später als Standard verwendet.

In die Simulationen wurden 10 000 Wolken mit insgesamt 50 Milliarden Sonnenmassen aufgenommen. Die Einzelmassen der Wolken überspannten anfänglich einen Bereich von 1000 bis zehn Millionen Sonnenmassen. Sternentstehung setzte erst dann ein, wenn eine Wolke einen kritischen Wert von 10 000 Sonnenmassen überschritten hatte, wobei in jeder Sternentstehungsperiode drei Prozent des Gases in Sterne umgesetzt wurde. Gleichzeitig wurde die Periode, mit der eine Sternentstehungsperiode auftreten kann, auf zwanzig Millionen Jahre festgelegt. Im Mittel ergab sich hieraus eine Sternentstehungsrate von 1.5 Sonnenmassen pro Jahr. Am Ende der Simulation, die eine

Milliarde Jahre überspannte, hatten sich aus dem Gas im Halo Sterne mit insgesamt einigen Milliarden Sonnenmassen gebildet.

Das Massenspektrum der entstehenden Sterne bestimmt ganz entscheidend die Frage, in welchen Mengen die schweren Elemente entstehen und ins interstellare Medium gelangen. Die Astronomen wählten für das Massenspektrum die klassische Salpeter-Funktion bis zu einer maximalen Sternmasse von 120 Sonnenmassen.

Ziel der Simulationen war es, die Entwicklung der Elemente Europium und Barium im Verhältnis zu Eisen gezielt zu verfolgen, weil für diese Elemente gute Beobachtungsdaten vorliegen. Diese schweren Elemente gelangen innerhalb von einer Milliarde Jahre durch Explosionen von Supernovae vom Typ II ins interstellare Medium. Bei Barium müssen zudem Winde von masseärmeren Sternen in einer späten Entwicklungsphase als Riesensterne in Betracht gezogen werden. Die Erzeugungsraten der Elemente in einem Supernova-Ausbruch sind nicht genau bekannt, sie bewegen sich jedoch in einem Bereich von einigen 10^{-7} Sonnenmassen für Europium und einigen 10^{-6} Sonnenmassen für Barium.

Zeitliche Entwicklung der Metallhäufigkeiten

Mit diesen Vorgaben ließ sich mit dem Modell verfolgen, wie sich die Häufigkeiten von Eisen sowie von Europium und Barium im Innern der einzelnen Wolken zeitlich entwickeln. Hierbei trat der Effekt verschmelzender Wolken mit unterschiedlichen Sternentstehungsperioden deutlich hervor. Abb. IV.15 zeigt die Häufigkeit von Eisen im Verlaufe von einer Milliarde Jahre. Im Vergleich hierzu wurde eine theoretische Alter-Häufigkeits-Funktion eingetragen. Diese berücksichtigt jedoch nicht die beschriebenen Verschmelzungsprozesse von Wolken mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung.

Abb. IV.15 zeigt deutlich, dass die eindeutige Relation zwischen Alter und Elementhäufigkeit durch eine statistische Analyse der Messdaten ersetzt werden muss. Man erkennt beispielsweise, dass nach einigen zehn Millionen Jahren eine breite Häufigkeitsverteilung von Eisen (ausgedrückt im Verhältnis zu Wasserstoff: Fe/H) zwischen 10^{-6} und 10^{-2} möglich ist. Erst nach etwa hundert Millionen Jahren haben sich die Wolken weitgehend vermischt. Das Gas wird dadurch zunehmend homogen, und die Werte streben einem Verhältnis von etwa 10^{-2} entgegen. Grundsätzlich ist es aber nach wie vor möglich, dass ein Stern der Population II eine höhere Eisenhäufigkeit aufweist als einer der Population I.

Ebenso ließ sich modellieren, wie sich das Halogas mit Europium anreichert. In Abb. IV.16 wird die Häufigkeit jedoch nicht in Abhängigkeit von der Zeit, sondern von dem entsprechenden Verhältnis Fe/H gezeigt. Auch hier erkennt man im Vergleich zum einfachen Modell eine breite Streuung der Werte. Erste geringe Eu-Konzentrationen treten nach den ersten Supernova-Explosionen von Sternen mit

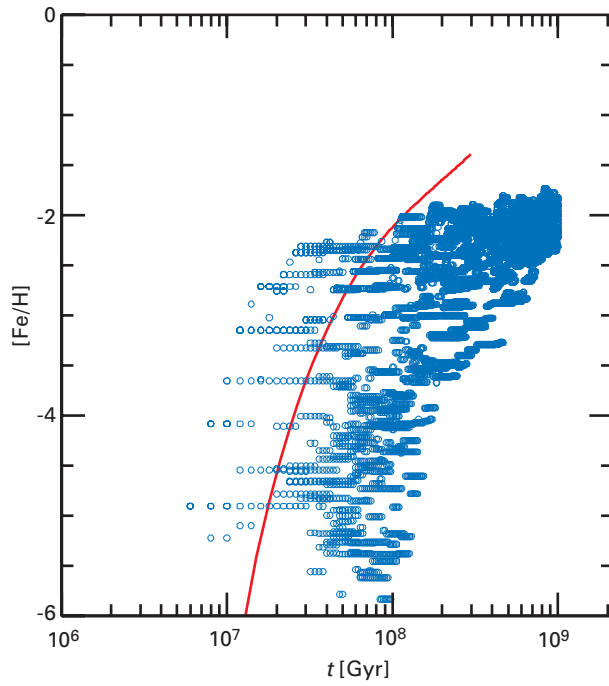


Abb. IV.15: Entwicklung der Eisenhäufigkeit innerhalb von einer Milliarde Jahre. Die Punkte geben die Werte des numerischen Modells wider, die durchgezogene Linie ist das Ergebnis eines chemischen Entwicklungsmodells ohne das Verschmelzen von Gaswolken.

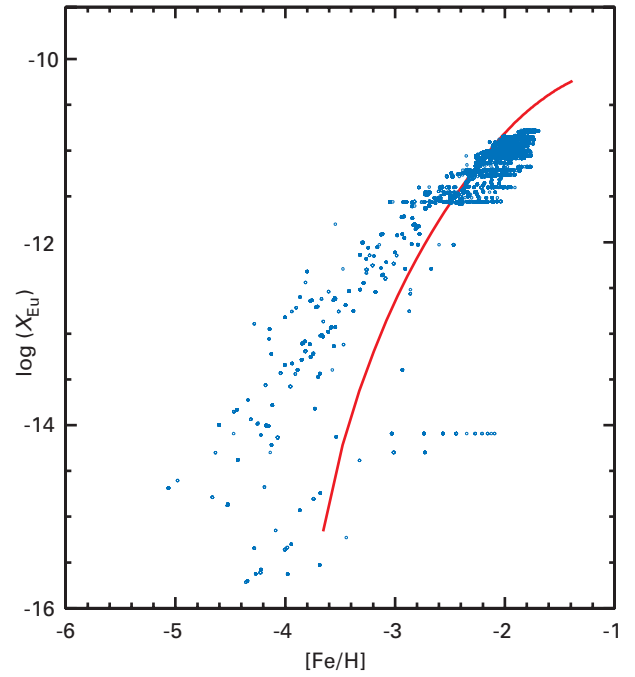


Abb. IV.16: Anreicherung von Europium relativ zum Eisengehalt.

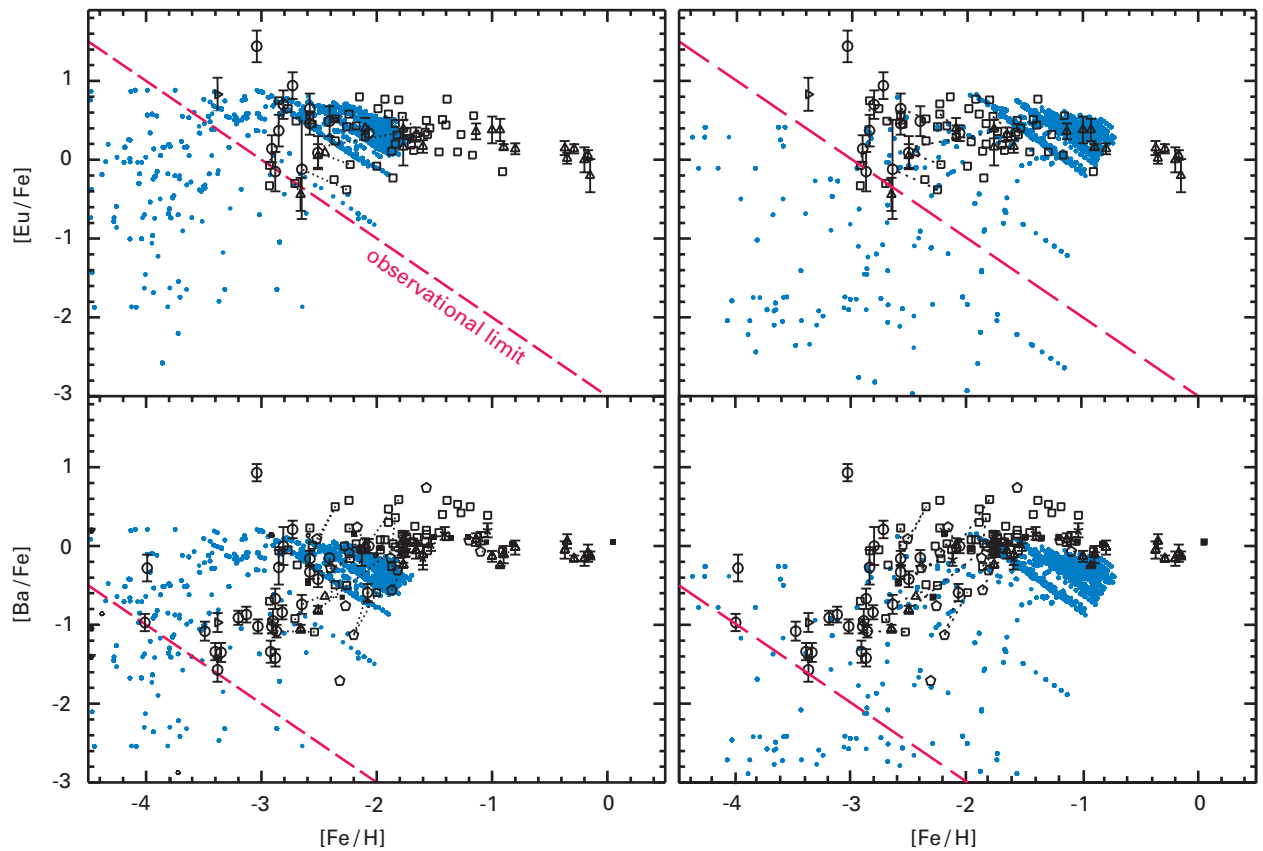


Abb. IV.17: a) Die berechneten Häufigkeitsverhältnisse (kleine offene Kreise) im Vergleich zu den Messwerten. Unterhalb der gestrichelten Geraden sind noch keine Messungen möglich.

b) wie a), jedoch mit zehnmal so hoher Effizienz der Sternentstehung.

acht bis zehn Sonnenmassen auf und korrespondieren mit Werten von $\text{Fe}/\text{H} = 10^{-5}$. In dem Modell gibt es jetzt sogar Fälle, in denen Wolken bereits mit Europium angereichert sind und ein Verhältnis $\text{Fe}/\text{H} = 10^{-5}$ aufweisen, aber später entstanden sind als Wolken mit einem größeren Fe/H -Verhältnis.

Dies verdeutlicht, dass eine Altersbestimmung von Sternen aufgrund der Elementhäufigkeiten nur mit großen Unsicherheiten bzw. nur auf statistischer Basis möglich ist. Und es erklärt die breiten Variationen in den gemessenen Elementhäufigkeiten. Um diese mit den Modellvorhersagen zu vergleichen, wurden die Häufigkeitsverhältnisse Eu/Fe und Ba/Fe jeweils relativ zu Fe/H aufgetragen (Abb. IV. 17a). Man erkennt, dass die breite Streuung wiedergegeben wird. Einzig bei hohen Eisenhäufigkeiten ($\text{Fe}/\text{H} = 0.1$) liefert das Modell keine Werte. Dies ändert sich, wenn man in den Wolken eine höhere Effizienz der Sternentstehung (30 % Umsatz des Gases in Sterne) annimmt (Abb.

IV. 17b). Es ist ein Vorteil dieses Modells, dass sich der Einfluss unterschiedlicher Parameter, wie die Sternentstehungsrate oder die Erzeugungsraten der Elemente in den Supernovae, auf die zeitliche Entwicklung der Elementhäufigkeiten im Halo erkennen lassen.

Interessant sind zwei weitere Vorhersagen des Modells. Zum einen müsste es sehr viele Sterne mit kleineren Eu/Fe - und Ba/Fe -Verhältnissen geben als bislang beobachtet. Sie liegen unter der gestrichelten Geraden. Zum anderen sagt das Modell für das Halo die Existenz von Sternen mit $\text{Fe}/\text{H} < 10^{-4}$ voraus. Auch sie wurden bislang nicht gefunden. Mit empfindlicheren Messinstrumenten als sie heute zur Verfügung stehen, werden sich diese Voraussagen des Modells vielleicht bald überprüfen lassen. In Zukunft wird sich mit diesem Modell auch die zeitliche Entwicklung weiterer Elemente, die auch in anderen Sternen, etwa in Roten Riesen entstehen, berechnen lassen.

(C. Travaglio, A. Burkert)

IV.2 Extragalaktische Astronomie

Das tiefste Bild im Infraroten – Inventur der stellaren Massen hoch rotverschobener Galaxien

Eine der vordringlichsten Aufgaben der Astrophysik besteht darin, die Entstehung und Entwicklung der Galaxien zu verstehen. Erst moderne Beobachtungstechniken haben es in jüngster Zeit ermöglicht, eine große Zahl von Galaxien bis in großen Entfernungen zu studieren. Astronomen des Instituts haben gemeinsam mit Kollegen aus den Niederlanden eine Galaxiendurchmusterung am Südhimmel begonnen. Bei diesem Faint Infrared Extragalactic Survey (FIRES) werden Aufnahmen des Weltraumteleskops HUBBLE im sichtbaren Licht mit neuen Aufnahmen im nahen Infrarot kombiniert, die mit dem Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte (ESO) gewonnen wurden. Dies sind die derzeit tiefsten und besten Aufnahmen in diesem Wellenlängenbereich. Ziel ist es unter anderem, über einen weiten Rotverschiebungsbereich hinweg die Helligkeitsverteilung, Größen und Formen von Galaxien und die zeitliche Entwicklung ihrer stellaren Massen zu ermitteln. Die ersten Ergebnisse bestätigen die Strategie der Methode und haben bereits eine Reihe interessanter Fakten zu Tage gefördert.

Die modernen Theorien der Entstehung und Entwicklung von Galaxien gehen von einem so genannten hierarchischen Szenario aus. Hierin bildeten sich zuerst galaktische „Bausteine“ aus dunkler Materie, Gas und Sternen. Erst durch dynamische Verschmelzungsprozesse wuchsen diese zu den heutigen großen Galaxien heran. Offen ist jedoch, in welchen Epochen bzw. bei welchen Rotverschiebungen diese Phase der Verschmelzung protogalaktischer Fragmente ihren Höhepunkt erreichte. Offen ist weiterhin, wie diese von der Dunklen Materie beschleunigten Prozesse auf die Sternentstehung einwirkten. Klar zu sein scheint, dass die kosmische Sternentstehung heute im Abklingen ist. Wann sie einsetzte, ist unbekannt – eventuell bei einer Rotverschiebung um $z = 6$ oder auch früher. Eines der Forschungsziele besteht darin, herauszufinden, wann die kosmische Sternentstehung am heftigsten war: Wann ist die Mehrzahl der heute existierenden Sterne entstanden?

Bisherige Galaxiendurchmusterungen konnten das hierarchische Szenario qualitativ bestätigen, dennoch steht diese Forschung erst am Beginn. Galaxiendurchmusterungen sollen in Zukunft wesentliche neue Erkenntnisse bringen.

Der Faint Infrared Extragalactic Survey (FIRES)

Solche Durchmusterungen (englisch: Surveys) lassen sich in vielfältiger Weise durchführen, wobei die Art der astronomischen Erkenntnisse sehr wesentlich vom Wellenlängenbereich abhängt, in dem eine Durchmusterung durchgeführt wird. So hängen Struktur, Morphologie und Leuchtkraft der (Proto-) Galaxien von der Beobachtungswellenlänge ab. Denn als Folge der Expansion des Universums verschieben sich spezifische Merkmale in der Strahlung einer Galaxie spektral mit zunehmender Entfernung: Das heute empfangene Licht einer Galaxie, deren Rotverschiebung $z = 1.5$ beträgt, wurde ausgesandt, als das Universum erst etwa ein Viertel seines heutigen Alters hatte. Die intensive UV-Strahlung junger, heißer Sterne ist bei einer so weit entfernten Galaxie von einer ursprünglichen Wellenlänge von etwa 200 nm im UV nach 500 nm in den Bereich des sichtbaren Lichts verschoben. Eine Himmelsdurchmusterung im sichtbaren Licht wird demnach im Wesentlichen für die UV-Emission empfindlich sein, die nur von Galaxien mit hoher Sternentstehungsrate kommen kann. Gerade diese Galaxien sind aber sehr häufig von starker Staubextinktion betroffen, was zur Folge hat, dass sie wesentlich lichtschwächer erscheinen als sie in Wirklichkeit sind.

Ein Galaxiensurvey im Infraroten verspricht demgegenüber eine Reihe bedeutender Verbesserungen. Der größte Teil der Gesamtmasse jeder Sternpopulation befindet sich in Sternen, die ihr Emissionsmaximum im Bereich des sichtbaren Licht haben, das dann durch die Rotverschiebung ins Infrarote gelangt. Demnach muss man in diesem Wellenlängenbereich beobachten, um die zeitliche Entwicklung der Sternmassen in den Galaxien zu ermitteln. Ziel von FIRES ist es, möglichst viele Galaxien über einen großen Rotverschiebungsbereich bei identischen Ruhewellenlängen zu beobachten. Die Ruhewellenlänge ist die unverschobene Wellenlänge der ausgesandten Strahlung am Ort der jeweiligen Galaxie. Darüber hinaus lassen sich im Infraroten Galaxien mit hoher Sternentstehungsrate bis zu einer Rotverschiebung von $z = 10$ anhand ihrer UV-Emission zu entdecken.

FIRES ist ein von Astronomen aus Heidelberg, Leiden (Niederlande) und Garching durchgeführtes Beobachtungsprogramm am Very Large Telescope der ESO in Chile. Es wurden mehrere Himmelsfelder am Südhimmel im nahen Infrarot beobachtet, von denen es sehr tiefe optische Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble gibt. Insbesondere wurde das Hubble Deep Field South (HDF-S) bei zwei Beobachtungskampagnen 1999 und 2000 in den drei Filterbereichen mit 100 Stunden Belichtungszeit aufgenommen. Die Astronomen nutzten hierfür das Instrument

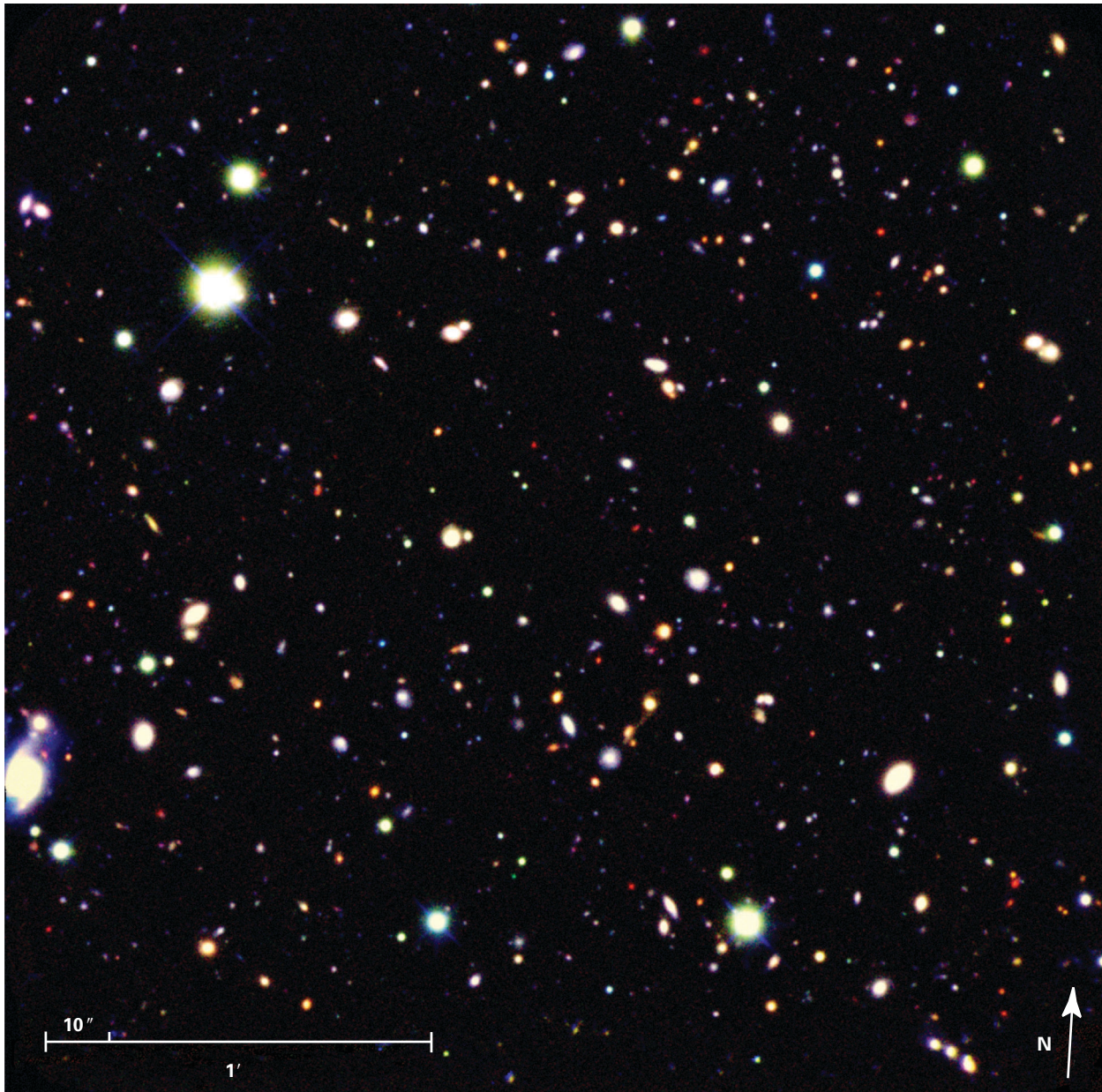


Abb. IV.18: Das Hubble Deep Field South, aufgenommen mit ISAAC am VLT. Dargestellt ist hier eine Überlagerung der drei Aufnahmen bei 1.25, 1.65 und 2.2 μm Wellenlänge.

FIRES am VLT. Zusammen mit der in vier Filterbereichen gewonnenen Hubble-Aufnahme des HDF-S lag damit die weltweit tiefste Aufnahme eines Himmelsfeldes in sieben Filterbereichen von 0.3 μm bis 2.2 μm vor (Abb. IV.18). Die Aufnahme im K-Bereich (2.2 μm) ist die tiefste jemals bei dieser Wellenlänge erstellt. Darüber hinaus wurden im Rahmen von FIRES drei exzellente Aufnahmen des Galaxienhaufens MS 1054-03 bei 1.25 μm , 1.65 μm und 2.2 μm gewonnen.

Aus diesen Daten wurden zunächst die Rotverschiebungen der Galaxien ermittelt. Dies geschah nach der photo-

metrischen Methode. Dabei vergleicht man die Intensitäten in den gemessenen Filterbereichen mit exemplarischen Musterspektren unterschiedlicher Galaxientypen. Dazu wurden mehrere elliptische, spiralförmige und irreguläre Galaxien mit extrem hoher Sternentstehungsrate (Starburst-Galaxien) herangezogen. Abb. IV.19 zeigt einige Beispiele für dieses Verfahren.

Um die Genauigkeit dieser Methode zu überprüfen, wurden einige Galaxien im Feld mit FORS1 am VLT spektroskopiert. Das Ergebnis war äußerst ermutigend: Die photometrisch ermittelten Rotverschiebung z der Galaxien mit Helligkeiten bis zu 23.5 mag bei 2.2 μm Wellenlänge waren bis auf $\Delta z/(1+z) = \pm 0.07$ genau. Der gesamte Galaxienkatalog im HDF-S bestand aus 136 Objekten, die erstmalig aufgrund ihrer Helligkeit im nahen Infrarot ausgewählt wurden.

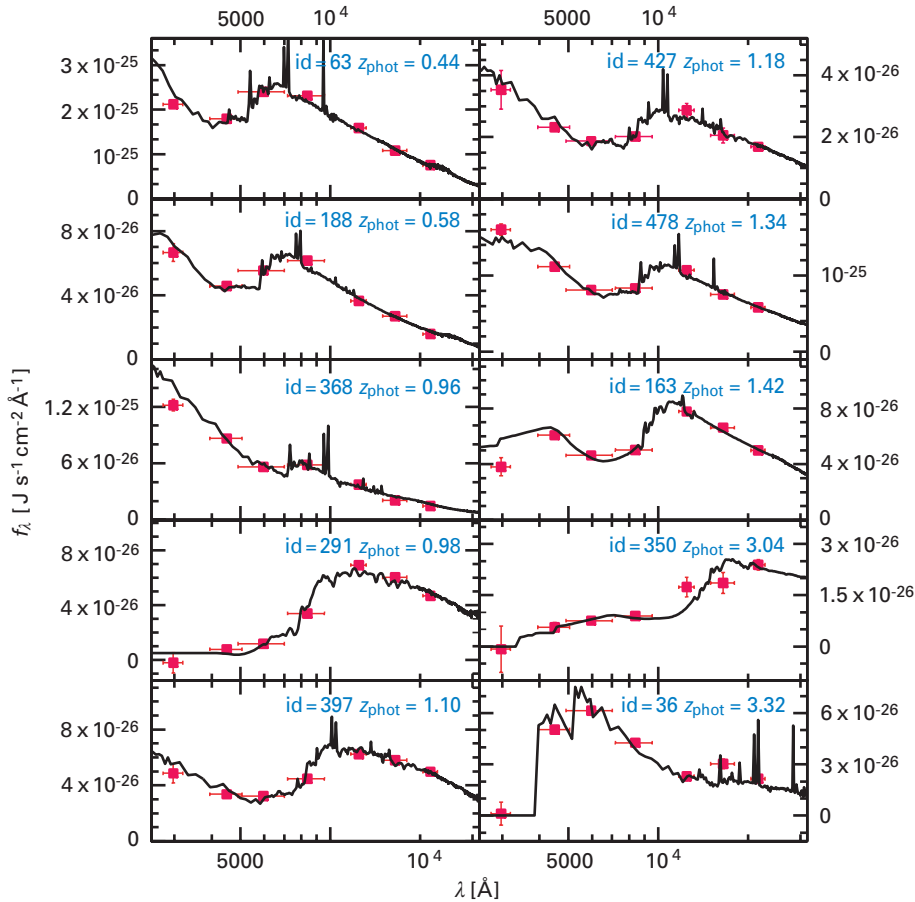


Abb. IV.19: Vergleich der photometrischen Daten (Quadrate) mit Muster-spektren unterschiedlicher Galaxientypen bei verschiedenen Rotverschiebungen z .

Helle und massereiche Galaxien im frühen Universum

Aus den Daten lässt sich sofort die Verteilung der Rotverschiebungswerte ermitteln (Abb. IV.20). Sie zeigt ein deutliches Maximum bei $z = 0.5$ und einen breiten Flügel bis $z = 1.4$. (Bei einer Rotverschiebung von $z = 0.5$ sehen wir die entsprechende Galaxie in einem Zustand, als das Universum etwa halb so alt war wie heute.) Eine weitere Analyse zeigt, dass sich in diesem Rotverschiebungsintervall vorwiegend helle Galaxien befinden.

Aus den Daten lässt sich auch die Entwicklung der Leuchtkraft in Abhängigkeit von der Rotverschiebung ableiten. Abb. IV.21 zeigt das Ergebnis für die Leuchtkraft im blauen Bereich. Auffällig ist die Vielzahl von Galaxien mit mehr als 5×10^{10} Sonnenleuchtkräften jenseits von $z = 2$. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Galaxiendurchmusterungen des nahen Universums ist diese Zahl sehr hoch. Sie ließe sich damit erklären, dass die Galaxien im jungen Universum aufgrund ihrer hohen Sternentstehungsrate rund dreimal heller waren als heute. Eine detaillierte Untersuchung dieser hellen Galaxien wird über Vorgänge Aufschluss geben, die sich ereigneten, als das Alter des Universum erst 15 bis 20 Prozent seines heutigen Alters betrug.

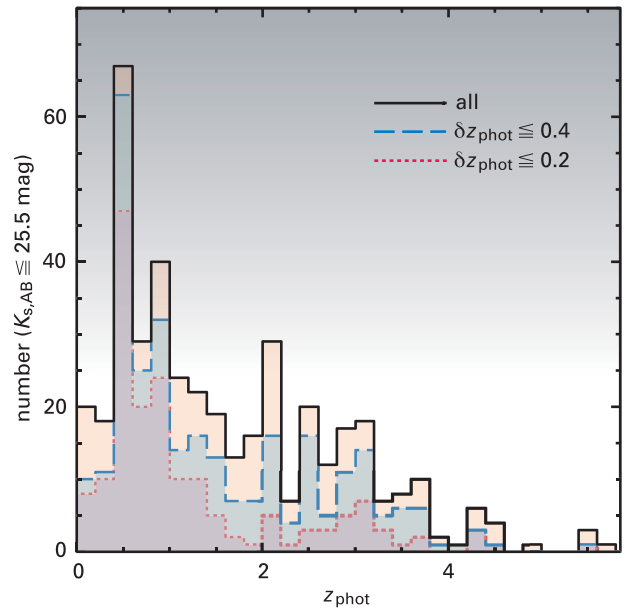


Abb. IV.20: Rotverschiebungsverteilung von 132 Galaxien bis zu einer Grenzhelligkeit von 23.5 mag bei $2.2 \mu\text{m}$ Wellenlänge.

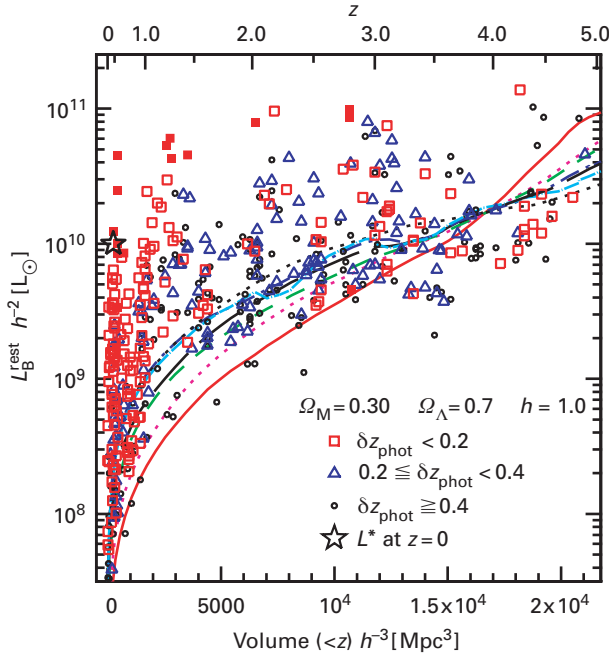


Abb. IV.21: Die Entwicklung der Leuchtkraft im Blauen in Abhängigkeit von der Rotverschiebung, im Vergleich mit hierarchischen Modellen der Galaxienentstehung. Auf der unteren Skala ist das bis zur jeweiligen Rotverschiebung z beobachtete Volumen angegeben.

Eine ungewöhnlich große Scheibengalaxie bei $z = 3$

Hierarchische Modelle der Galaxienentwicklung sagen voraus, dass im frühen Universum klein alle Galaxien und kompakt waren. Große Galaxienscheiben sollten erst relativ spät bei Rotverschiebungen kleiner als $z = 1$ durch Materieeinfall entstanden sein. Überraschenderweise entdeckten die Forscher jedoch eine Galaxie mit einer ungewöhnlich großen Ausdehnung von etwa 1.7 Bogensekunden bei der hohen Rotverschiebung von $z = 2.793$ (Abb. IV.22). Abhängig vom verwendeten kosmologischen Modell entspricht dies einem realen Durchmesser zwischen

20 000 und 30 000 Lichtjahren. Bei dieser hohen Rotverschiebung dominiert auf den optischen Aufnahmen die Strahlung heißer, junger Sterne. Im sichtbaren Bereich zeigt sich hier eine ringartige Struktur, ganz ähnlich den großen Sternentstehungszonen in lokalen Spiralgalaxien wie M 31 oder M 81. Mit wachsender Wellenlänge verschwindet dieser Ring zunehmend und weicht einer eher gleichförmigen, kompakteren Helligkeitsverteilung. Im nahen Infrarot erscheint die Galaxie symmetrisch mit einer zentralen Aufhellung, die einem Galaxienbulge heutiger Spiralgalaxien ähnelt.

Die im nahen Infrarot sichtbare zentrale Verdichtung und die Ringstruktur sprechen gegen das Bild von zwei miteinander verschmelzenden Galaxien, wie es das hierarchische Szenario nahe legt. Prinzipiell könnten ausgedehnte Staubwolken die wellenlängenabhängige Morphologie erklären, da die optische Strahlung stärker durch Absorption geschwächt ist als die infrarote. Attraktiv erscheint aber eine andere Erklärung. Die zentrale Verdichtung im Infraroten könnte von einer alten Sternpopulation stammen, während die eher ringförmig verteilte Emission im Optischen von jungen Sternen stammen könnte. Sehen wir hier also eine große Spiralgalaxie im jungen Universum mit einer alten Kern- und einer jungen Scheibenpopulation?

Dieses Szenario und die ungewöhnliche Größe der Scheibe widersprechen also den meisten theoretischen Modellen der hierarchischen Galaxienentwicklung. Ihnen zufolge sollte die Größe der Vorläufersysteme der heutigen Galaxien nicht einmal ein Zehntel der hier beobachteten Scheibe betragen. In zukünftigen Untersuchungen müssen weitere große Scheiben im jungen Universum geucht werden, denn eine einzelne Ausnahme kann leicht mit ungewöhnlichen Umständen erklärt werden.

Alte Galaxien bei $z = 2$?

Aus den vorhandenen Daten ließen sich nach der Klassifikation der Galaxien deren Farben im jeweiligen Ruhe-

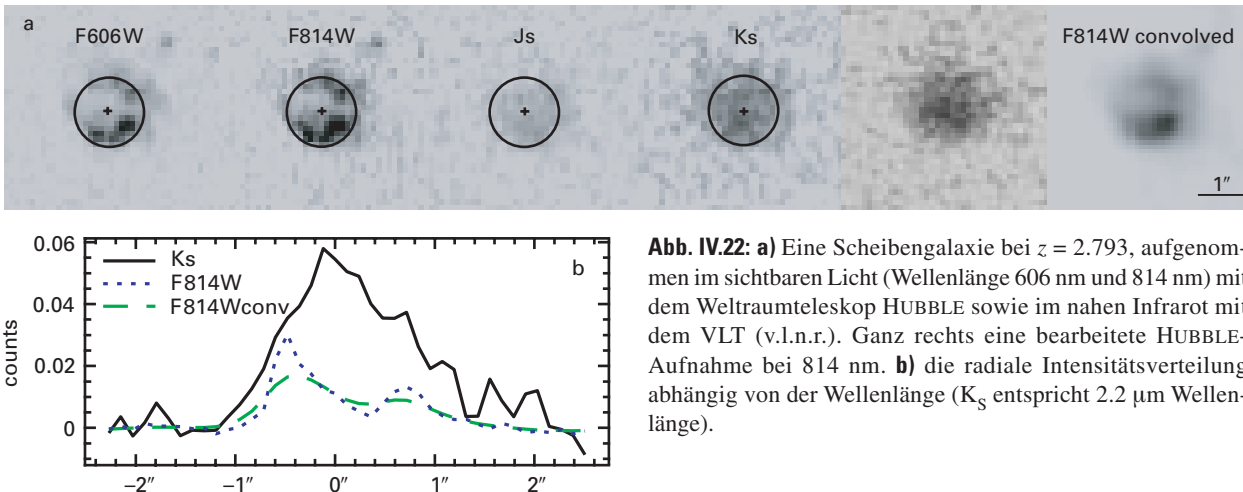


Abb. IV.22: a) Eine Scheibengalaxie bei $z = 2.793$, aufgenommen im sichtbaren Licht (Wellenlänge 606 nm und 814 nm) mit dem Weltraumteleskop HUBBLE sowie im nahen Infrarot mit dem VLT (v.l.n.r.). Ganz rechts eine bearbeitete HUBBLE-Aufnahme bei 814 nm. **b)** die radiale Intensitätsverteilung abhängig von der Wellenlänge (K_s entspricht $2.2 \mu\text{m}$ Wellenlänge).

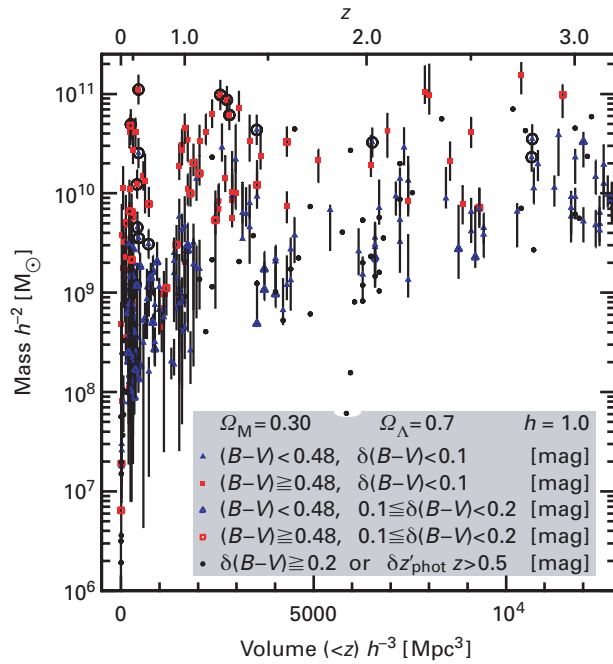


Abb. IV.23: Entwicklung der in den Sternen enthaltenen Masse in Galaxien in Abhängigkeit von der Rotverschiebung. Die Quadrate kennzeichnen rote, die Dreiecke blaue Galaxien. Eingekreiste Symbole stehen für Galaxien mit spektroskopisch gemessener Rotverschiebung.

system ermitteln. Hierbei fiel auf, dass in allen Entfernungsbereichen zahlreiche rote Systeme hoher Leuchtkraft existieren. Zwar ist ihr Anteil etwas geringer als derjenige der blau leuchtenden Galaxien, aber sie sollten viel höhere Masse-zu-Leuchtkraft-Verhältnisse (M/L) haben. Deshalb ist es wahrscheinlich, dass sie innerhalb eines Rotverschiebungsintervalls dennoch maßgeblich zur insgesamt vorhandenen Sternmasse beitragen.

Unter Zuhilfenahme theoretischer Modelle wurde versucht, ein zeitabhängiges M/L -Verhältnis zu konstruieren und daraus die Sternmassen in den Galaxien zu bestimmen. Im heutigen Universum ist für Spiralgalaxien $M/L \approx 2$ und für elliptische Galaxien $M/L \approx 5$. Wie Abb. IV.23 demonstriert, sind bei allen Rotverschiebungen die roten Galaxien die massereichsten. Ein solches Ergebnis kann nur mit Infrarotdaten erhalten werden. Dennoch müssen auch hier Staub und andere Effekte noch genau berücksichtigt werden. Das gegenwärtige Ergebnis sollte als erste Annäherung an dieses Problem verstanden werden.

Grenzen und zukünftige Aufgaben

Galaxiendurchmusterungen dieser Art werden zukünftig verstärkt durchgeführt werden. Die hierfür notwendigen lichtstarken Teleskope sowie die empfindlichen Kameras mit großen Bildfeldern sind seit kurzem vorhanden. Künftige Surveys sollten vor allem zwei Fragen angehen: Inwiefern beeinflussen großräumige Strukturen in der Ga-

laxienverteilung (Supergalaxienhaufen) und starke Staubextinktion in den Galaxien die Ergebnisse?

Was den ersten Punkt angeht, so muss man sich vergegenwärtigen, dass FIRES bis zu einer Rotverschiebung von $z = 1$ ein Volumen abdeckt, das nur etwa zwei Dritteln eines typischen Supergalaxienhaufens entspricht. Zwischen $z = 2$ und $z = 3.5$ entspricht es etwa dem vierfachen Volumen. Im nahen Bereich bis $z = 1$ können demnach zufällige Galaxienhäufungen oder Lücken das statistische Ergebnis signifikant verfälschen.

Dieser Mangel wird in einem ersten Ansatz durch Beobachtungen im Bereich des Galaxienhaufens MS 1054-03 behoben. Er überdeckt eine etwa viermal so große Fläche wie das HDF-S. Darüber hinaus eignet sich die neue Advanced Camera for Surveys an Bord des Welt- raumteleskops HUBBLE für solche Durchmusterungen. Auch die am MPIA im Bau befindliche Weitfeldkamera OMEGA 2000, die am 3.5-Meter-Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums arbeiten soll, ist für Surveys im nahen Infrarot exzellent geeignet (s. Kapitel II).

(Gregory Rudnick, Hans-Walter Rix)

Staub in Galaxienhaufen

Im Jahre 1997 sorgten Astronomen des Instituts für Aufregung, als sie die Entdeckung von Staub im Coma-Galaxienhaufen bekannt gaben (Jahresbericht 1997, S. 26). Es war der erste direkte Nachweis von intergalaktischem Staub überhaupt. Sie hatten damals die Ferninfrarotdaten des Weltraumteleskops ISO für ihre Analyse genutzt. Im vergangenen Jahr nahm das selbe Team die Beobachtungsdaten von fünf weiteren Galaxienhaufen genau unter die Lupe, doch dieses Mal wurden sie nicht fündig. Der Coma-Haufen ist offenbar eine Ausnahmeerscheinung. Das neue Ergebnis widerspricht einer zwanzig Jahre alten, umstrittenen Theorie, wonach das heiße Gas im Innern der Galaxienhaufen in so genannten Cooling flows (Kühlströmen) abkühlt und zu Staub kondensiert. Es unterstützt neueste Beobachtungen mit dem europäischen Röntgenteleskop XMM-NEWTON, die ebenfalls die Theorie der Cooling flows zu widerlegen scheinen.

Der Raum zwischen den Galaxien ist nicht gänzlich leer, wie es auf Bildern im sichtbaren Licht den Anschein hat. Vielmehr existiert dort ein sehr fein verteiltes, viele Millionen Grad heißes Gas. Wegen seiner hohen Temperatur strahlt es ausschließlich im Röntgenbereich. Dieses intergalaktische Gas weist eine mittlere Dichte von etwa tausend Atomen pro Kubikmeter auf – etwa tausend mal geringer als die Dichte des diffusen interstellaren Gases innerhalb des Milchstraßensystems.

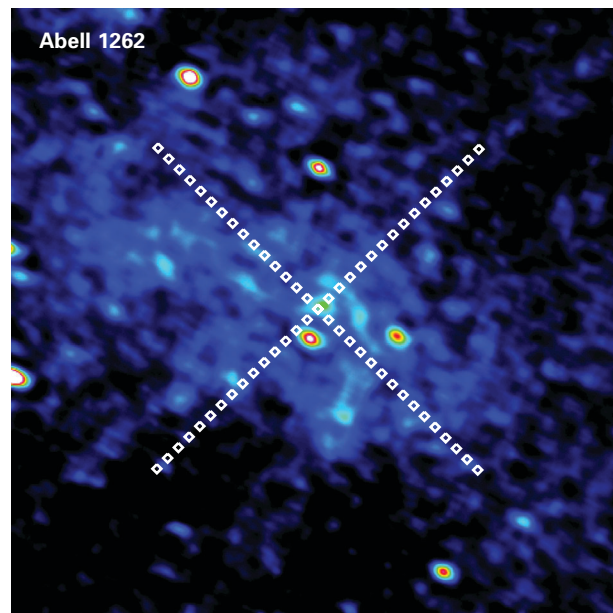
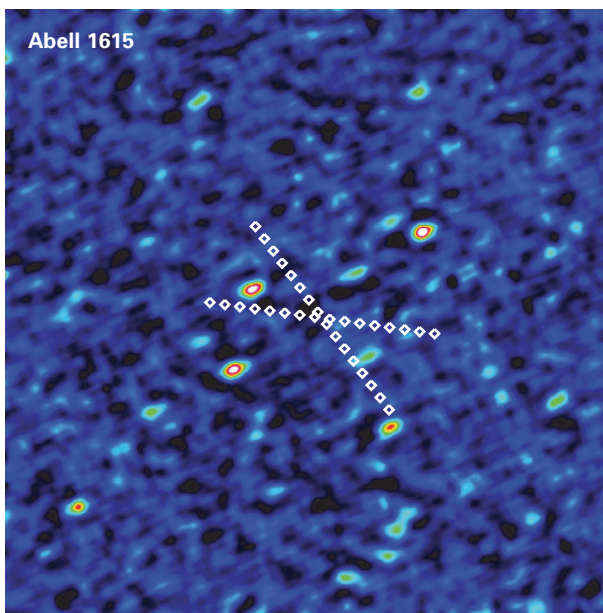
Die Entdeckung dieses intergalaktischen Gases führte in den 80er Jahren zu einer Theorie, die bis heute umstritten ist: Einige Astrophysiker zogen damals aus der zum Haufenzentrum hin stark konzentrierten Röntgenemission den Schluss, dass das Gas dort sehr dicht und kühler sein

müsste als weiter außen. Die Abkühlung sollte in einem sich selbst verstärkenden Prozess weiter zunehmen und das Gas letztendlich in einer noch unbekannten Form kondensieren, etwa in Sternen oder in kalten dichten Wolken mit Staub. Das Auskondensieren vermindert den Druck im Innern, so dass weiter außen befindliches Gas nach innen nachströmt und sich dabei ebenfalls immer stärker abkühlen und dann kondensieren kann. Der nach innen gerichtete Gasstrom sich abkühlenden Gases gab dem Phänomen den Namen *Cooling flow*.

Aus den damals vorhandenen Messdaten schätzten die Forscher ab, dass in den *Cooling flows* auf diese Weise in

Evidenz für die Existenz von diffus verteiltem, intergalaktischem Staub.

Mit dem unter Leitung des MPIA gebauten Instruments ISOPHOT ergab sich eine weitere Möglichkeit, dieses Problem anzugehen und Galaxienhaufen im bislang nicht zugänglichen Spektralbereich jenseits von $100\ \mu\text{m}$ Wellenlänge zu beobachten, wo sich sehr kalter Staub bemerkbar macht. Neben dem Coma-Haufen beobachteten die Astronomen fünf weitere, nach speziellen Gesichtspunkten ausgewählte Haufen. Von dem Coma-Haufen ist bekannt, dass er derzeit mit anderen, kleineren Galaxiengruppen verschmilzt. Es wurde daher vermutet, der Staub sei bei die-



Extremfällen jedes Jahr mehr als tausend neue Sterne entstehen – eine unglaublich hohe Rate im Vergleich zu einer durchschnittlichen Spiralgalaxie wie der Milchstraße, in der jährlich etwa ein neuer Stern aufleuchtet. Dieser prognostizierte Vorgang müsste demnach die Entwicklung von Galaxienhaufen ganz erheblich beeinflussen.

Diese aufsehenerregende Theorie ließ sich jedoch nie zweifelsfrei bestätigen. Es gab lediglich einige vage Hinweise auf die Existenz von Staub, zum Beispiel bei der Untersuchung von Galaxien und Quasaren, die hinter Galaxienhaufen stehen. Hierbei hatte es Hinweise darauf gegeben, dass die Flächendichte beobachtbarer Hintergrundgalaxien zum Zentralgebiet eines davor befindlichen Haufens hin abnimmt. Dies ließe sich mit einer homogenen Staubverteilung im Innern des Haufens erklären. Sie würde das Licht, welches den Zentralbereich durchläuft, stärker absorbieren als jenes in den Randbereichen.

Alle Studien dieser Art waren jedoch nicht überzeugend. Abschätzungen ergaben, dass die visuelle Extinktion im Zentralgebiet des Coma-Haufens weniger als 0.3 Größenklassen betragen müsse. Eine Untersuchung von mehr als 60 Haufen im Infrarot mit dem Satellitenteleskop IRAS sowie im Submillimeterbereich brachte keine klare

Abb. IV.24: Die Galaxienhaufen Abell 1656 (Coma) und Abell 262, aufgenommen mit dem Infrarotsatelliten IRAS bei $100\ \mu\text{m}$ Wellenlänge. Eingezeichnet sind die gekreuzten, mit ISOPHOT aufgenommenen Scans.

sem Vorgang aus den eindringenden Galaxien herausgefegt worden und nicht, wie im *Cooling-flow-Modell* behauptet, aus dem intergalaktischen Gas auskondensiert. Bei der Auswahl der anderen fünf Haufen wurde auf eine möglichst große morphologische Vielfalt geachtet. Sie überdeckten einen Rotverschiebungsbereich von $z = 0.023$ bis $z = 0.076$, entsprechend Entfernungen von etwa 650 bis 2100 Milliarden Lichtjahren.

Mit Belichtungszeiten zwischen 50 und 100 Minuten wurden die fünf Galaxienhaufen 1997/1998 mit ISOPHOT beobachtet. Jeder Haufen wurde in zwei senkrecht zueinander verlaufenden Achsen gescannt und die Intensitäten bei $120\ \mu\text{m}$ und $185\ \mu\text{m}$ Wellenlänge gemessen (Abb. IV.24).

Für die anschließende Analyse wurden die IR-Flüsse der vier Detektorelemente zunächst für jede Aufnahme einzeln bestimmt und anschließend gemittelt. Schon bei der Untersuchung des Coma-Haufens (identisch mit Abell

1656) hatte sich gezeigt, dass der Staub erst sichtbar wird, wenn man die Intensitäten bei 120 μm und 185 μm zueinander ins Verhältnis setzt. Erst dann hatte sich eine um das Zentralgebiet nahezu symmetrische Intensitätserhöhung gezeigt. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass der intergalaktische Staub im Coma-Haufen andere Strahlungseigenschaften aufweist als der in unserer eigenen Milchstraße befindliche, galaktische Zirkus.

Zudem muss bei der Analyse dem Zodiakallicht Rechnung getragen werden. Dieser diffuse Staub in unserem Sonnensystem strahlt aufgrund seiner relativ hohen Temperatur nur sehr wenig im Ferninfraroten jenseits von 100 μm . Liegt aber zufällig eine begrenzte Region des galaktischen Zirkus direkt vor einem Galaxienhaufen, so wird der kleine Beitrag des Zodiakallichts dieselbe charakteristische Änderung des 120 μm /185 μm -Verhältnisses hervorrufen wie der intergalaktische Staub im Galaxienhaufen selbst. Aus den Unterschieden der 120 μm /185 μm -Verhältnisse mit und ohne Zodiakallichtbeitrag lässt sich somit der Verursacher einer Änderung des 120 μm /185 μm -

Verhältnisses ermitteln. Wenn allerdings der intergalaktische Staub ähnliche Eigenschaften hat wie der galaktische Zirkus, lassen sich selbst durch Abziehen des Zodiakallichtbeitrags die beiden Komponenten nicht mehr voneinander trennen.

Nach diesem Verfahren wurden alle Galaxienhaufen analysiert. Der Coma-Haufen zeigte erneut einen nahezu symmetrischen Intensitätsverlauf (Abb. IV.25). Jedoch ließ sich bei keinem anderen Haufen ein vergleichbarer Intensitätsverlauf nachweisen. Am Beispiel des Haufens Abell 262 wird dies erkennbar. In dem Intensitätsverhältnis der Flüsse bei 120 μm und bei 185 μm (Abb. IV.26a) findet sich um den Zentralbereich herum ein Minimum. Nach Subtraktion des Zodiakallichtanteils (Abb. IV.26b) zeigt sich jedoch nur noch eine monotone Steigung. Sie ist auf galaktischen Zirkus in der Milchstraße zurückzuführen.

Der Staub im Coma-Haufen muss andere Eigenschaften, wie Temperatur, Größe und Zusammensetzung der Partikel, besitzen als der galaktische Zirkus, ansonsten ließen sich die beiden Komponenten nicht voneinander trennen.

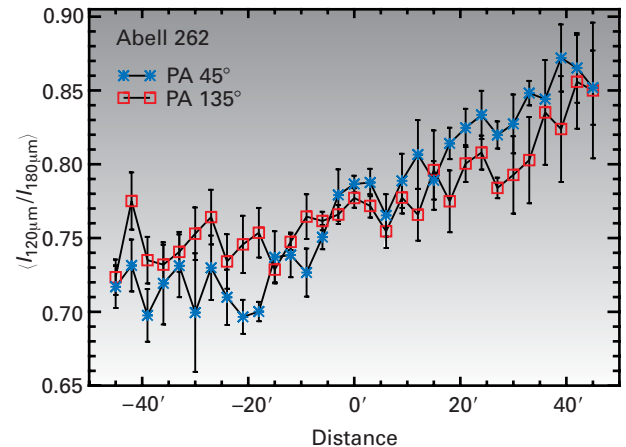
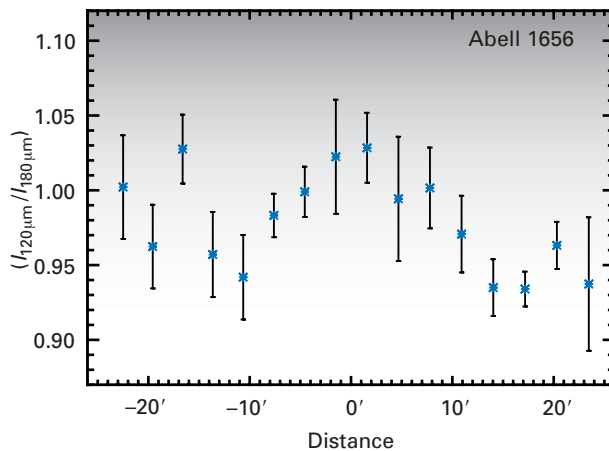
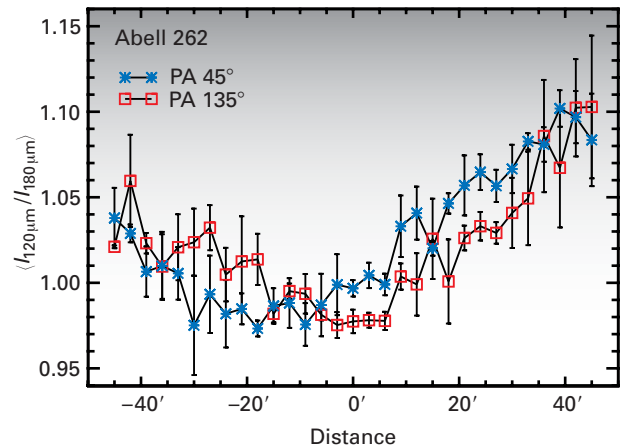
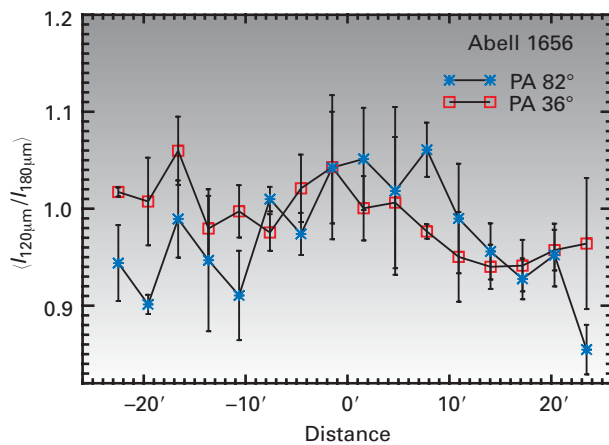


Abb. IV.25: a) Das Verhältnis der Flüsse bei 120 μm und bei 185 μm Wellenlänge entlang der beiden Scans durch den Coma-Haufen (Abell 1656) nach Abzug des Zodiakallichts; **b)** Mittel aus den beiden in a) gezeigten Scans.

Abb. IV.26: a) Intensitätsverteilung der Flüsse bei 120 μm und bei 185 μm Wellenlänge entlang der zwei Scans durch den Galaxienhaufen Abell 262 nach Abzug des Zodiakallichts; **b)** Mittel aus den beiden in a) gezeigten Scans. Der lineare Anstieg ist auf galaktischen Zirkus im Vordergrund zurückzuführen.

nen. Allerdings lassen sich diese Eigenschaften nur schwer ermitteln. Aus den Daten ergibt sich eine Mindesttemperatur von 30 K. Vermutlich befinden sich kaum mehr als 10^7 Sonnenmassen an kaltem Staub im Innern des Haufens. Hieraus resultiert auch eine sehr geringe optische Extinktion von weniger als 0.1 Größenklassen.

Wenn es in den anderen Galaxienhaufen Staub geben sollte, dann nur in äußerst geringen Mengen. Das bestätigt die Vermutung, dass intergalaktischer Staub in den meisten Galaxienhaufen keine Rolle spielt. Wahrscheinlich liegen im Coma-Haufen, wie bereits erwähnt, besondere Bedingungen vor. Zwei Möglichkeiten für dessen Entstehung werden derzeit diskutiert: Entweder wird der Staub durch Sternwinde ständig aus den Galaxien in den intergalaktischen Raum geblasen, oder er wurde aus den Galaxien herausgefeht, als zwei Galaxienhaufen miteinander verschmolzen. Insbesondere das zweite Szenario könnte auf den Coma-Haufen zutreffen. Verschiedene Beobachtungen deuten nämlich darauf hin, dass dieser Galaxienhaufen ein verhältnismäßig geringes dynamisches Alter besitzt und aus zwei sich durchdringenden oder miteinander verschmelzenden Haufen besteht, deren Zentralgalaxien einst NGC 4889 bzw. NGC 4874 waren.

Für die Kosmologie ist dieses Ergebnis ebenfalls von großer Bedeutung. Es belegt nämlich, dass intergalaktischer Staub den Blick auf entfernte Bereiche des Universums kaum beeinträchtigt. Das ist zum Beispiel in Hinblick auf verschiedene Methoden der Entfernungsbestimmung von großer Bedeutung.

Insbesondere aber liefern die Ergebnisse ein starkes Argument gegen die Cooling-flow-Hypothese. Auch jüngste Beobachtungen im Röntgenbereich mit dem europäischen Weltraumteleskop XMM-NEWTON scheinen diese Theorie zu widerlegen. Es ließ sich mit ihnen kein abkühlendes Gas nachweisen. Wahrscheinlich muss man hieraus den Schluss ziehen, dass das intergalaktische Gas ständig ge-

heizt wird. Eine denkbare Möglichkeit hierfür sind die energiereichen Teilchenstrahlen, Jets, die aus den Zentren aktiver Galaxien herausschießen. Auch dieses Phänomen untersuchen Astronomen des MPIA (s. den nachfolgenden Abschnitt). (Manfred Stickel, U. Klaas, D. Lemke)

Der Jet des Quasars 3C 273

Eine Vielzahl von Radiogalaxien und Quasaren zeigt ein interessantes Phänomen: Aus dem Zentralbereich schießen ein oder zwei Gasstrahlen, so genannte Jets, heraus. Sie können sich bis zu mehrere Millionen Lichtjahren weit ins All erstrecken, bevor sie in ausgedehnten Radioblasen enden. Bis heute sind im Radiobereich mehrere hundert Jets bekannt. Etwa 15 sind auch im sichtbaren Licht beobachtbar. Aber nur drei von ihnen sind genügend weit ausgedehnt und ausreichend hell, um sie räumlich aufgelöst zu untersuchen. Zu ihnen gehört der Jet des Quasars 3C 273. Astronomen des MPIA haben ihn mit hoher Auflösung sowohl mit dem Weltraumteleskop HUBBLE als auch im Radiobereich mit dem Very Large Array untersucht. Diese neuen Daten legen den Schluss nahe, dass es im Jet zwei Teilchenpopulationen mit unterschiedlichen Energien gibt. Das wirft neue Fragen zu dem Beschleunigungsprozess dieser Partikel im Jet auf.

Der Jet von 3C 273 lässt sich im Optischen zwischen 11 und etwa 20 Bogensekunden Abstand vom Quasar nachweisen, was einer projizierten Länge vom Kern von 123 000 Lichtjahren entspricht. (Hierbei wurde für die Hubble-Konstante der Wert 65 km/(s Mpc) angenommen.) Auf lang belichteten Aufnahmen erscheint der Jet als eine Folge heller Knoten, zwischen denen sich ein diffuses Medium befindet (Abb. IV.27).

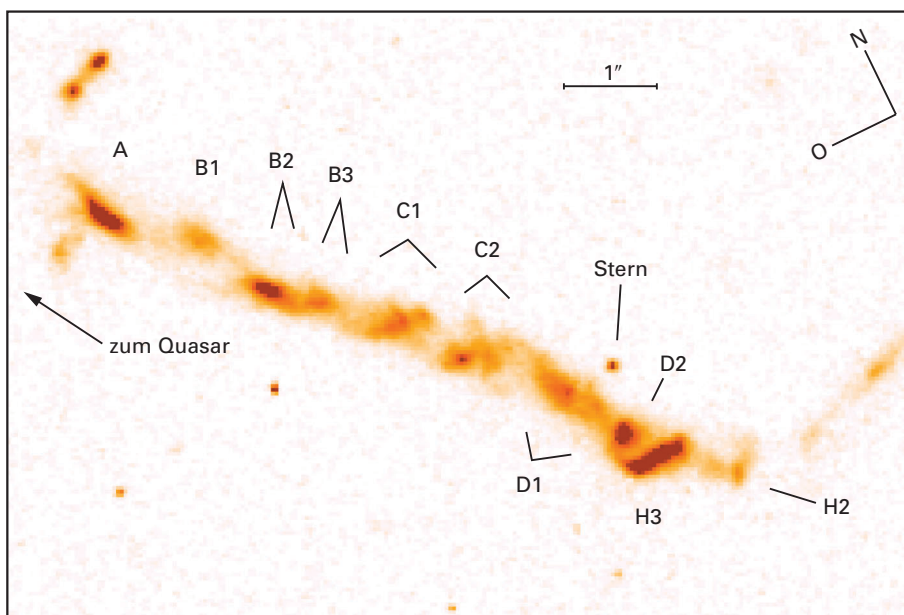


Abb. IV.27: Der Jet von 3C 273, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE. Die Auflösung ist hier durch die Pixelgröße von 0.05 Bogensekunden begrenzt.

Teilchenbeschleunigung und Synchrotronstrahlung

Der Jet entsteht im Zentrum des Quasars, wo sich nach der gängigen Theorie ein Schwarzes Loch befindet. Dieses ist von einer Gasscheibe umgeben, aus der Materie in das Schwarze Loch hineinstrudelt. Durch einen noch unbekannten Prozess wird Gas senkrecht zu der Scheibe wahrscheinlich durch Magnetfelder beschleunigt und zu Jets gebündelt, die sich in das intergalaktische Medium ausbreiten (Abb. IV. 28).

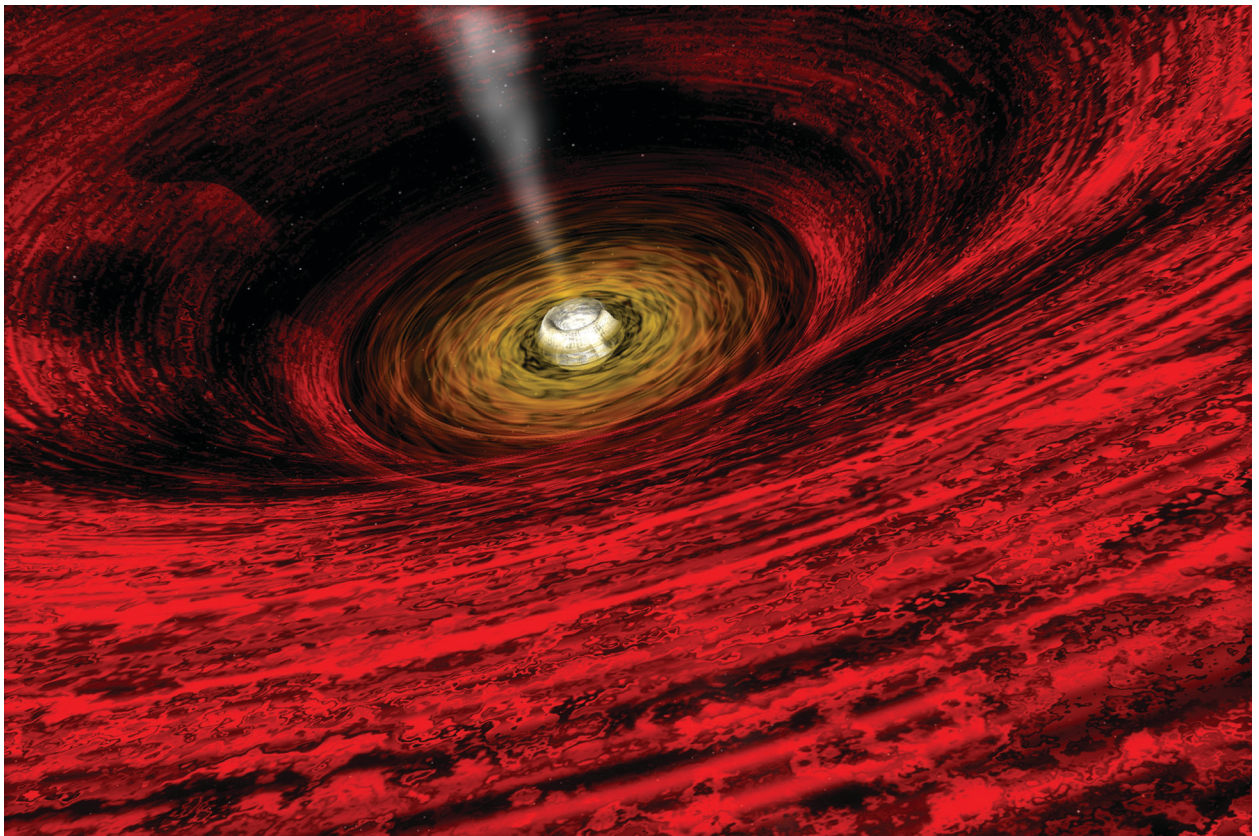
Bei der beobachteten Emission der Jets handelt es sich um Synchrotronstrahlung. Sie entsteht, wenn sich elektrisch geladene Teilchen in starken Magnetfeldern bewegen. In den Jets strömen wahrscheinlich überwiegend Elektronen, möglicherweise auch deren Antiteilchen, Positronen. Grundsätzlich lässt sich aber auch ein Plasma aus Elektronen und Protonen nicht ausschließen. Da die Synchrotronstrahlung ein reines Kontinuum ohne Absorptions- oder Emissionslinien bildet, ist die Strömungsgeschwindigkeit des Gases nicht direkt messbar. Aufgrund zahlreicher Befunde gilt es heute aber als sicher, dass sich das Gas in den Jets nahezu mit Lichtgeschwindigkeit nach außen bewegt.

Nach wie vor ist es aber ein Rätsel, auf welche Weise die Teilchen innerhalb dieser Jets dauerhaft auf hochrelativistische Energien beschleunigt werden. Synchrotronstrahlung bei einer gegebenen Frequenz wird nämlich nur von Elektronen mit einer bestimmten Energie abgestrahlt. Dabei strahlt ein Teilchen mit höherer Energie auch bei hö-

heren Frequenzen. Durch die emittierte Strahlung verliert es Energie und kann daher im Laufe der Zeit nur bei immer niedrigeren Frequenzen beobachtet werden. Ein Elektron, das ursprünglich optische oder infrarote Synchrotronstrahlung aussendet, hat schon nach einigen tausend Jahren so viel Energie verloren, dass es nur noch Radiostrahlung emittiert. Mit Sicherheit können daher die Elektronen, die im Infraroten oder Optischen strahlen, nicht die gesamte Länge des Jets von 3C 273 überbrücken. Sie müssen dort, wo sie ihre Strahlung abgeben, ständig nachbeschleunigt werden.

Astronomen des Instituts beschäftigen sich seit den achtziger Jahren intensiv mit extragalaktischen Jets und haben zur Klärung dieses Phänomens bereits bedeutende Beiträge geliefert. Erst 1997 gelang ihnen mit dem 3.5-Meter-Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums die erste tiefe Aufnahme vom 3C 273-Jet im nahen Infrarot. Die IR-Daten schlossen damals die Lücke zwischen dem optischen und dem Radiobereich. Sie waren für eine genaue Bestimmung des spektralen Intensitätsverlaufs der Synchrotronstrahlung sehr wichtig (s. Jahresbericht 1997, S. 64). Aus den Messwerten hatten die Astronomen geschlossen, dass die Teilchen nicht nur, wie lange Zeit vermutet, im Innern der Knoten beschleunigt werden, sondern auch in den Bereichen dazwischen.

Abb. IV.28: Computeranimation eines von einer Scheibe umgebenen Schwarzen Lochs, von dem ein Jet ausgeht.



Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE (HST) und mit dem Very Large Array (VLA)

Gemeinsam mit Kollegen aus den USA und aus Großbritannien beobachteten Astronomen des Instituts den Jet von 3C 273 mit der Wide Field and Planetary Camera 2 an Bord des HST. Die Belichtungszeiten betrugen knapp zehn Stunden im UV (301 nm Wellenlänge) und knapp drei Stunden im Roten (620 nm). In weiteren etwa zehn Stunden Beobachtungszeit mit der Infrarotkamera NICMOS an Bord des HST wurden Bilder bei der 1.6 Mikrometern Wellenlänge gewonnen. Die zweite Hälfte des Datensatzes bilden neue Beobachtungen mit dem VLA in Socorro, New Mexico. Aus den Radiodaten wurden Bilder bei 1.3 cm, 2 cm und 3.6 cm Wellenlänge ausgesucht. Diese wurden dann mit einer gemeinsamen Auflösung von 0.3 Bogensekunden, entsprechend 1800 Lichtjahren am Ort des Jets, den HST-Daten überlagert. So erhielten die Astronomen einen homogenen Datensatz.

Die neuen Beobachtungen – die bislang genauesten und tiefsten Aufnahmen dieses Jets – weisen einige neue Details auf. Beispielsweise sind auf den optischen Bildern kreuzförmige Strukturen der Knoten erkennbar, besonders deutlich in den Knoten C1 und C2 (Abb. IV.28). Sie könnten darauf hinweisen, dass der Jet schraubenförmig gedreht ist, ähnlich der Doppelhelix der DNS. Denkbar ist aber auch, dass die kreuzförmige Struktur durch die Überlagerung zweier Schockwellen im strömenden Plasma entsteht.

Aus den kombinierten Daten von VLA und HST ließ sich die spektrale Verteilung der Synchrotronstrahlung, also die Intensität der Emission in Abhängigkeit von der Frequenz, über einen sehr weiten Frequenzbereich ermitteln. Das emittierte Spektrum verläuft zunächst kontinuierlich und fällt dann oberhalb einer bestimmten Frequenz steil nach unten ab. Das heißt, es gibt kaum Elektronen, die oberhalb dieser Abbruchfrequenz Synchrotronstrahlung abgeben. Wegen des Zusammenhangs zwischen Frequenz und Teilchenenergie ergibt sich daraus die maximale Energie der Elektronen.

Anhand der neuen Daten konnte die Arbeitsgruppe die maximale Teilchenenergie räumlich aufgelöst bestimmen und so Variationen sowohl entlang des Jets als auch in Querrichtung messen (Abb. IV.29). Entlang des Jets zeigt sich eine generelle Abnahme der Maximalenergie der Teilchen mit wachsendem Abstand zur Galaxie. Entscheidend ist, dass die Maximalenergie sehr langsam und nahezu kontinuierlich abnimmt, und dass (mit Ausnahme der Knoten A-B, vgl. Abb. IV.27) die Variationen in der Maximalenergie weniger ausgeprägt sind als die Helligkeitsvariationen.

Dies bestätigt die Interpretation, dass die Elektronen im gesamten Bereich des Jets nachbeschleunigt werden und nicht nur in den Knoten. Dass dies so sein muss, belegen zudem Abschätzungen der Lebensdauer der relativistischen Elektronen. Wie oben erwähnt, verlieren sie durch die emittierte Synchrotronstrahlung so viel Energie, dass

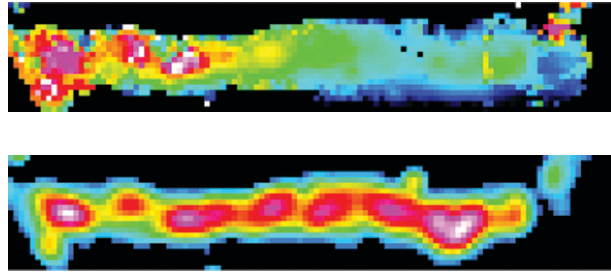


Abb. IV.29: a) Karte der Maximalenergie der Elektronen im Jet. Die Maximalenergie nimmt von violett und rot über grün zu blau ab; b) zum Vergleich ist das auf 0.3 Bogensekunden geglättete Bild des Jets bei 620 nm Wellenlänge gezeigt.

sie ohne Energienachschub die Distanz von etwa 6500 Lichtjahren zwischen zwei Knoten nicht überbrücken könnten, ohne dabei für das HST unsichtbar zu werden.

Zwei Populationen von Elektronen

Jüngste Beobachtungen mit dem Weltraumobservatorium CHANDRA belegen, dass mehr Jets als bislang vermutet auch Röntgenstrahlung aussenden. Bei 3C273 hatte man schon mit ROSAT Röntgenstrahlung nachweisen können. (Abb. IV.30). Wie entsteht die Röntgenstrahlung?

Es gilt als gesichert, dass die Emission im optischen wie im Radiobereich Synchrotronstrahlung ist, die von derselben Elektronenpopulation emittiert wird. Das belegen Beobachtungen, die Astronomen des Instituts bereits 1996 veröffentlicht haben. Die Röntgenstrahlung hingegen scheint nicht denselben Ursprung zu haben. Die Forscher am MPIA vermuteten vielmehr, dass eine zweite Teil-

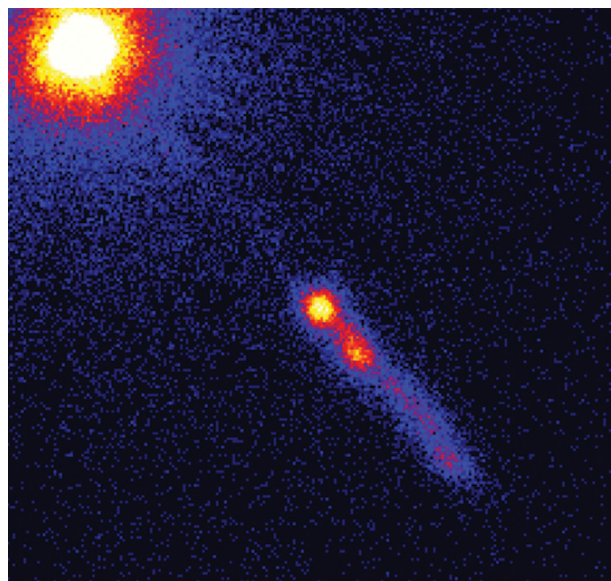


Abb. IV.30: Röntgenaufnahme des Jets von 3C 273 mit dem Röntgenteleskop CHANDRA. (NASA)

chenpopulation diese hochenergetische Strahlung abgibt – und gleichzeitig für einen signifikanten Teil der UV-Emission verantwortlich ist.

Die Analyse ergab nämlich, dass die Intensität der Jet-Strahlung im hochfrequenten optischen und UV-Bereich über den theoretisch ermittelten Werten liegen, wie sie sich aus einer Extrapolation der Werte im niederfrequenten Radio- und Infrarotbereich ergeben. Es ist das erste Mal, dass ein solches Verhalten in einem extragalaktischen Jet gefunden wurde. Dies deutet bereits darauf hin, dass die Emissionen in diesen beiden Spektralbereichen nicht von denselben Elektronen stammen.

Mit einem einfachen Modell konnten die Forscher durch eine Extrapolation der Röntgendaten den „Überschuss“ in den UV-Daten sehr gut wiedergeben, zumindest für die drei hellsten Knoten im Jet. Dies spricht für einen gemeinsamen Ursprung dieser beiden Beiträge. Die neuen Daten legen somit die Vermutung nahe, dass es eine zweite Elektronenpopulation gibt, die im UV- und im Röntgenbereich Synchrotronstrahlung abgibt.

Doch auch ein anderer Emissionsmechanismus kommt als Quelle der UV- und Röntgenstrahlung in Frage: der so genannte Selbst-Compton-Effekt. Hierbei stoßen die relativistischen Elektronen mit den Photonen der Synchrotronstrahlung zusammen. Dadurch erhalten die Photonen eine zusätzliche Energie und werden bis in den UV- und Röntgenbereich verschoben. Um dieses Modell mit den Beobachtungen in Einklang zu bringen, müsste der gesamte Jet eine hochrelativistische Geschwindigkeit haben und sich nahezu entlang der Sichtlinie bewegen.

Mit den vorliegenden Beobachtungsdaten lässt sich diese Frage jedoch nicht entscheiden. Hierfür werden weitere Messungen im optischen, UV- und Röntgenbereich benötigt, um den Spektralverlauf genauer festzulegen. Ideal wäre es, die Polarisation der Röntgenstrahlung zu messen. Solche Beobachtungen werden aber erst mit zukünftigen Weltraumobservatorien möglich sein.

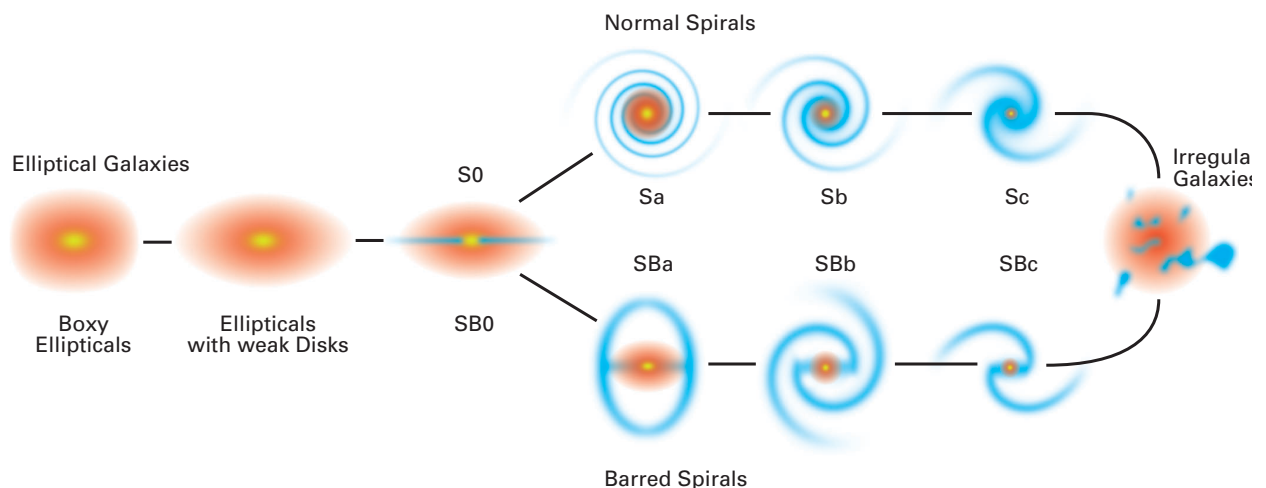
(S. Jester, H.J. Röser, K. Meisenheimer)

Spiralsysteme im Innern Elliptischer Galaxien

Vor etwa 80 Jahren entwarf Edwin Hubble ein Schema zur Klassifizierung von Galaxien, das im Wesentlichen noch heute gültig ist (Abb. IV.31). Seitdem unterscheidet man hauptsächlich zwischen Elliptischen, Spiral- und Irregulären Galaxien. Hubble mutmaßte damals, dass seinem Schema eine Entwicklungssequenz von den elliptischen zu den Spiralgalaxien zugrunde liegt. Das wird heute ausgeschlossen. Vielmehr deuten sowohl theoretische Überlegungen als auch die Beobachtungen zunehmend darauf hin, dass Elliptische Galaxien aus der Verschmelzung von Spiralgalaxien hervorgehen. Die Theoriegruppe des Instituts konnte diese Hypothese bereits vor zwei Jahren mit numerischen Simulationen bestätigen (Jahresbericht 1999, S. 67). Bei neuerlichen Rechnungen stießen die Forscher jedoch auf ein interessantes Phänomen: Um die beobachteten Bewegungen der Sterne in den Elliptischen Galaxien mit den Simulationen vollständig zu erklären, muss man die Existenz einer Sternpopulation annehmen, die in einer Scheibe um den Zentralbereich angeordnet ist.

Elliptische und Spiralgalaxien unterscheiden sich deutlich in ihrer Morphologie. In den Spiralgalaxien sind die Sterne in einer Scheibe angeordnet, in deren Zentralbereich ein mehr oder weniger stark ausgeprägter sphärischer Sternhaufen existiert, der so genannte Bulge (deutsch etwa Bauch oder Wulst). Die Spiralarme können unterschiedlich ausgeprägt sein. Elliptische Galaxien werden durch eine triaxiale Form beschrieben, die einem Rugby-Ball ähnelt. Der Abplattungsgrad hängt vom Blickwinkel ab, unter dem man das Sternsystem sieht. Schaut man in Richtung der Längsachse, so erscheint die Galaxie kreisförmig, senkrecht dazu stark elliptisch.

Abb. IV.31: Das von Hubble eingeführte Schema zur Klassifizierung der Galaxien.



Ganz wesentlich unterscheiden sich die beiden Galaxientypen auch hinsichtlich ihrer Kinematik. In den Scheiben der Spiralgalaxien dominiert die Rotationsbewegung der Sterne um das Zentrum. Eine zufällige Bewegung der Sterne relativ zueinander, die so genannte Geschwindigkeitsdispersion, ist hingegen gering. Sie beträgt nur etwa 10 % der Rotationsgeschwindigkeit. Bei Elliptischen Galaxien sind die Verhältnisse gerade umgekehrt. Hier bewegen sich die Sterne auf irregulären, ungeordneten Bahnen und die Geschwindigkeitsdispersion ist häufig größer als die Rotationsgeschwindigkeit.

Darüber hinaus treten innerhalb der Gruppe der Elliptischen Galaxien deutliche Unterschiede auf. Zum einen

gibt es Systeme, die verhältnismäßig schnell rotieren und in deren Innerem die Isophoten (Linien gleicher Helligkeit) von der perfekten elliptischen Form abweichen. Sie sind länglicher (disky) und ähneln eher den Isophoten der Scheiben. Andere Systeme wiederum rotieren langsamer und besitzen eckige (boxy) Isophoten.

Astronomen des Instituts konnten diesen Unterschied mit Hilfe numerischer Simulationen erklären. Demnach entstehen Elliptische Galaxie mit kastenförmigen Isophoten aus der Verschmelzung zweier gleich großer Spiralgalaxien, während sich die leuchtkraftarmen Elliptischen Galaxien mit scheibenförmigen Isophoten bilden, wenn eine massereiche mit einer massearmen Spiralgalaxie verschmilzt.

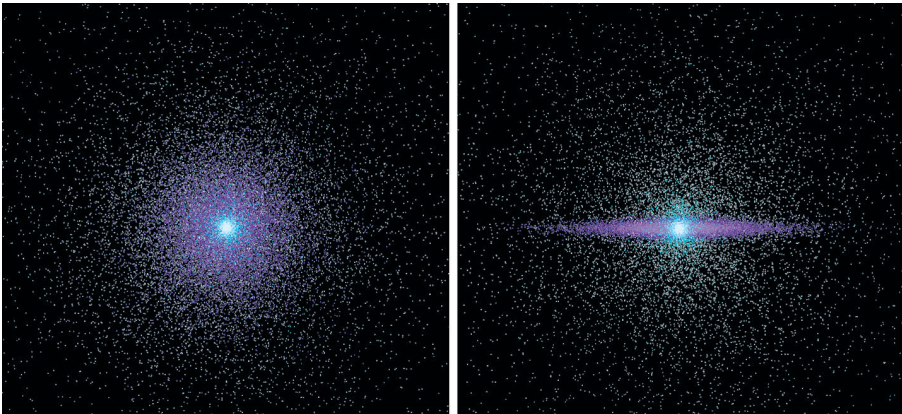


Abb. IV.32: Die Verteilung der Testteilchen einer Spiralgalaxie zu Beginn einer Simulation.

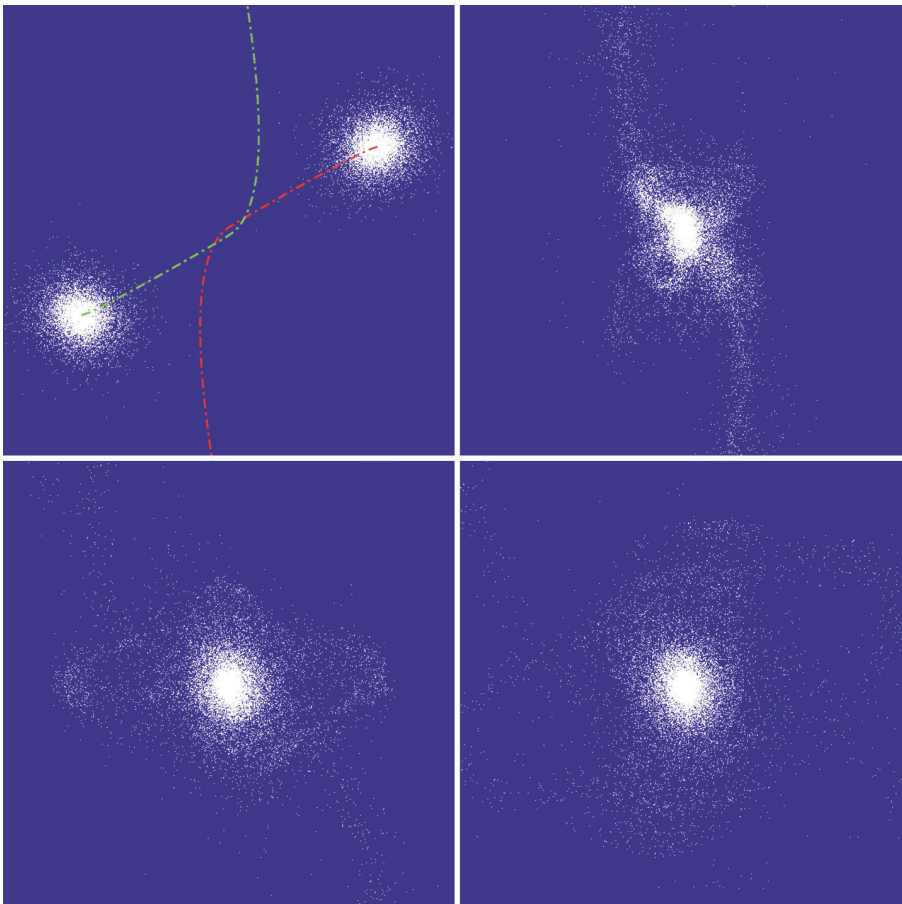


Abb. IV.33: Vier Schritte beim Verschmelzen zweier gleich großer Spiralgalaxien zu einer Elliptischen Galaxie. Die gestrichelten Linien zeigen die Bahnen der Galaxien.

Während sich die photometrischen Eigenschaften der Elliptischen Galaxien sehr gut mit dem Verschmelzungsszenario erklären lassen, blieben bei den kinematischen Eigenschaften noch Fragen offen. In neuen Simulationsrechnungen wollten die Theoretiker nun auch die beobachteten Geschwindigkeitsdispersionen erklären.

Simulationen der Kinematik

Bei diesen Rechnungen wurden, wie auch schon bei den vorherigen Simulationen, zwei Fälle unterschieden: Zum einen die Vereinigung von zwei gleich großen Spiralgalaxien und zum anderen von zwei Spiralgalaxien deren Massenverhältnis 3:1 beträgt. Die massereichen Galaxien wurden mit jeweils 200 000 Testteilchen dargestellt, wobei diese aus dem zentralen Bauch (20 000 Teilchen), einer Scheibe mit exponentiell abfallendem Dichteprofil (60 000 Teilchen) und einem sphärischen Halo aus Dunkler Materie (120 000 Teilchen) bestanden (Abb. IV.32). Im Falle des 3:1-Modells wird die kleinere Galaxie durch ein Drittel der Teilchenmenge dargestellt.

In den Simulationen wurde lediglich das dynamische Verhalten der Teilchen, also deren gravitative Wechselwirkung, untersucht. Kompliziertere Vorgänge innerhalb einer Gaskomponente (Kompression, Aufheizung, Sternentstehung usw.) wurden ignoriert. Zudem wählten die Astronomen zwei unterschiedliche Bewegungsgeometrien, in denen sich zwei gleichsinnig bzw. gegensinnig rotierende Scheiben auf parabolischen Bahnen einander nähern. Die beiden Scheiben sind um 30 bzw. -30 Grad relativ zur Umlaufebene geneigt. Wie das Team in einer separaten Studie zeigen konnte, führen diese beiden Geometrien zu allgemein repräsentativen Ergebnissen. Nach dem Verschmelzen wurde eine ausreichende Zeitspanne weitergerechnet, um das entstandene System im Gleichgewichtszustand betrachten zu können (Abb. IV.33).

Anschließend wurde die projizierte Geschwindigkeitsverteilung der Sterne so aus dem Modell entnommen, wie man sie bei Teleskopbeobachtungen messen würde. Dies ermöglichte den Vergleich zwischen den Modellergebnissen und tatsächlich gemessenen Werten. Schließlich wurden die für jedes Messintervall ermittelten Geschwindigkeiten der Teilchen mit einer Gauß-Funktion angepasst. Dies ist eine Möglichkeit, die aus den Simulationen erhalten Werte mit den beobachteten Messwerten quantitativ zu vergleichen.

Abb. IV.34 zeigt die Geschwindigkeit, normiert auf die Geschwindigkeitsdispersion (v/σ) in Abhängigkeit von der Größe H_3 . Ein großer (negativer oder positiver) Wert für v/σ bedeutet eine schnell (retrograd oder prograd) rotierende Galaxie. H_3 ist ein Maß für die Asymmetrie der Gauß-Funktion. Wie man deutlich erkennt, stimmen die simulierten Werte (Punkte) mit den für Elliptische Galaxien typischen Werten (Striche) nicht überein. Dies bedeutet, dass es in den realen Elliptischen Galaxien mehr Sterne gibt, die sich mit hoher Bahngeschwindigkeit um das Zen-

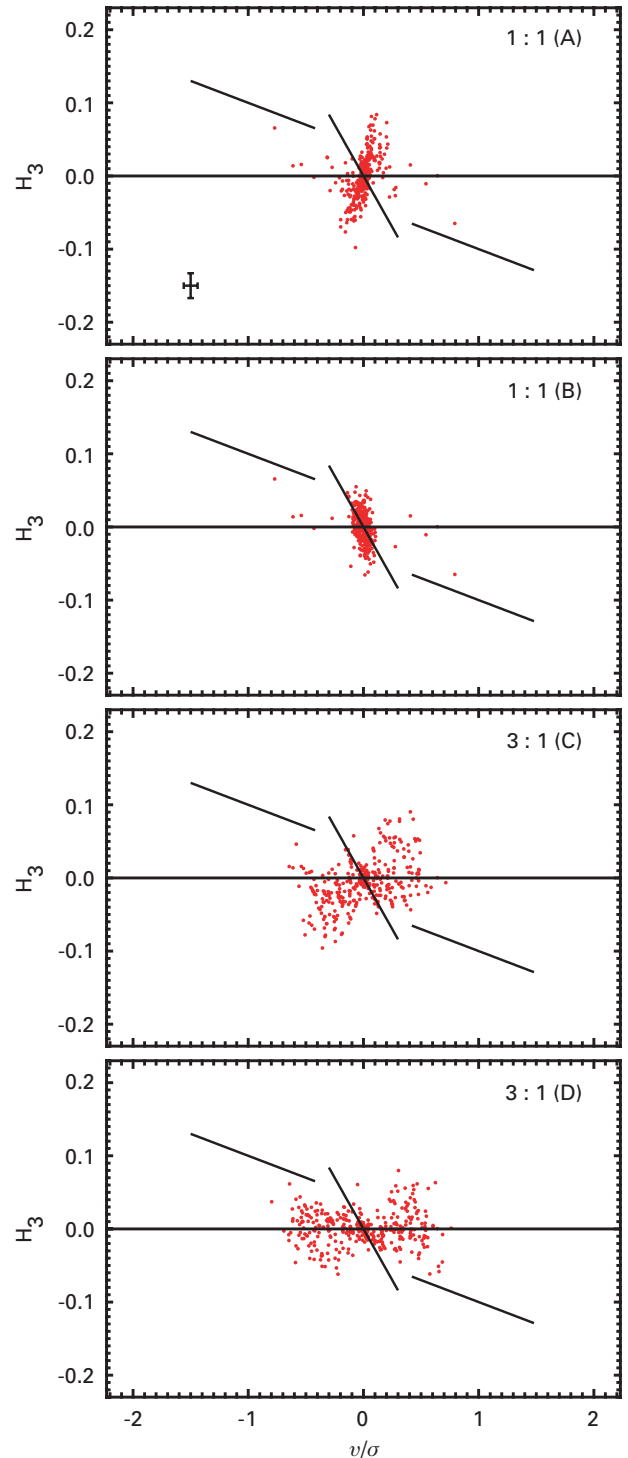


Abb. IV.34: Korrelationen von v/σ in Abhängigkeit von H_3 . Jeder Punkt repräsentiert den Wert für das entsprechende Modell bei Ansicht aus 50 unterschiedlichen Blickwinkeln. Die Striche geben typische Beobachtungswerte wieder.

trum bewegen, als sich aus den Modellen ergibt. Lediglich das Modell B zweier gleich großer, gegensinnig rotierender Galaxien, die miteinander verschmelzen, stimmt in etwa mit den Beobachtungen überein. Dieser Fall ergibt stark anisotrope Elliptische Galaxien ohne signifikante Rotation.

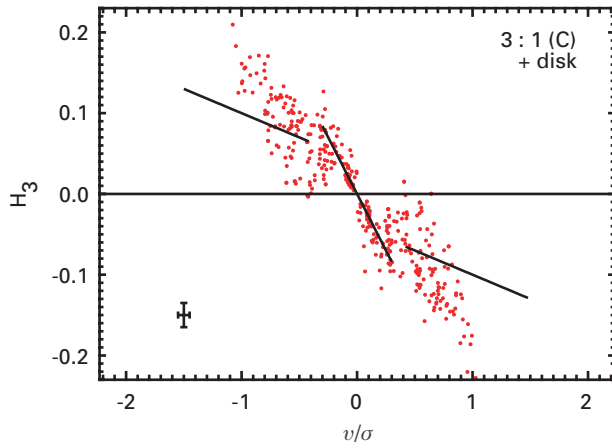
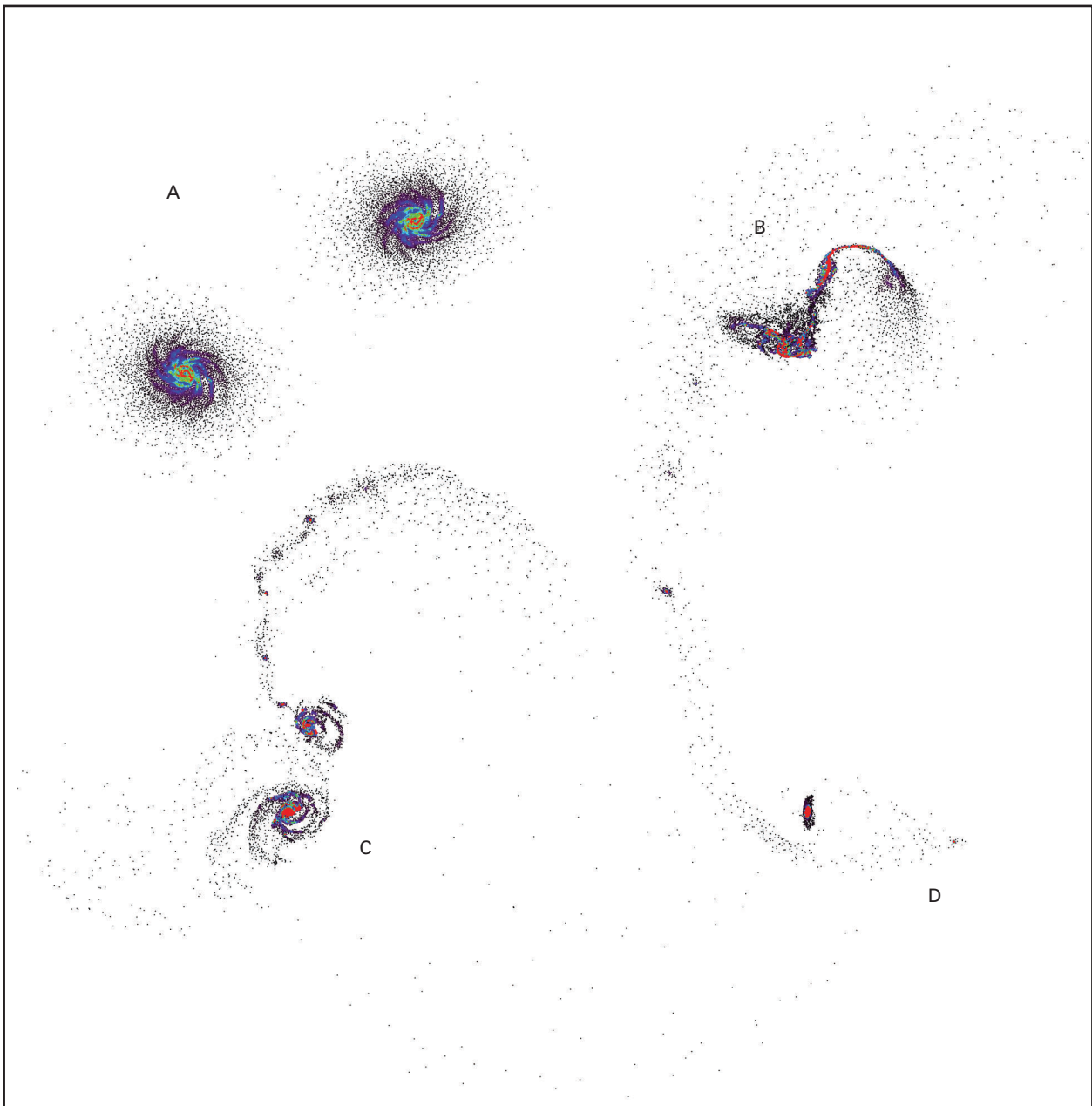


Abb. IV.35: Modell C mit einer zusätzlichen scheibenförmigen Komponente.

Interessanterweise lassen sich die Modellwerte wesentlich besser mit den beobachteten Werten in Übereinstimmung bringen, wenn man die Existenz einer Scheibe im Zentralbereich der Elliptischen Galaxie annimmt. Bei den weiteren Simulationen, die auch eine solche Scheibe berücksichtigten, blieben deren Masse und Ausdehnung freie Parameter. Abb. IV.35 zeigt, wie sich die Anwesenheit einer solchen Scheibe auf die Kinematik des Systems auswirkt. Hier wurde in das 3:1-Modell eine dünne zentrale Scheibe eingesetzt, deren Masse 15 % der gesamten

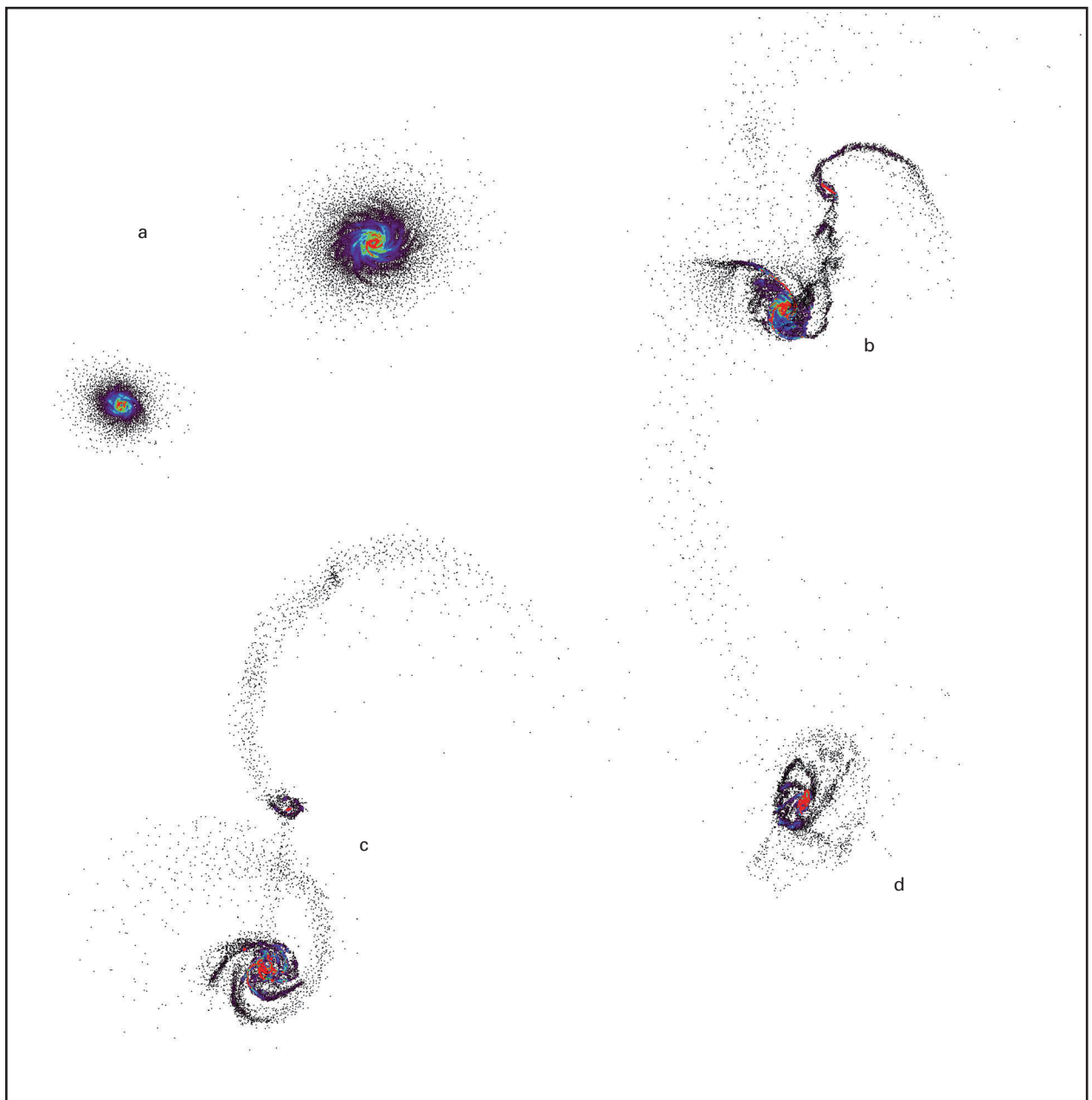
Abb. IV.36: Zeitschritte bei dem Verschmelzen zweier Spiralgalaxien: A, B, C, D mit Massenverhältnis 1 : 1 und a, b, c, d mit Massenverhältnis 1 : 3. Gezeigt ist das Verhalten der Gaspartikeln.



Galaxienmasse und deren Radius dem 1.25-fachen des Halblightradius der Elliptischen Galaxie entspricht. Wählt man eine massereichere Scheibe, so stimmen die theoretischen Werte nicht mehr mit den beobachteten Werten überein.

Die Autoren vermuten daher, dass in den Zentren nahezu aller Elliptischer Galaxien eine scheibenförmige Komponente existiert, deren Massenanteil 10 bis 20 % ausmacht. In den 1990er Jahren wurden tatsächlich einige solche Fälle beobachtet, insbesondere in schnell rotierenden Galaxien mit „disky“ Isophoten. Auf welche Weise solche Scheiben entstehen können, ist noch unklar. Möglicherweise bilden sie sich als Folge des Verschmelzungsprozesses. Auch diese Idee testeten die Theoretiker des Instituts mit numerischen Simulationen.

Bis dahin hatten sie in ihren Rechnungen die komplizierte Wechselwirkung des interstellaren Gases nicht berücksichtigt. In den neuen Simulationen erweiterten sie ihr Modell um diese Komponente. Nun zeigte es sich, dass während des Verschmelzungsvorgangs der Spiralgalaxien große Mengen Gas in Form langer „Gezeitenarme“ von der Galaxie fortgeschleudert werden, wie man es beispielsweise in dem berühmten Fall der Antennengalaxie (NGC 4038/4039) im Sternbild Rabe auch beobachtet (Abb. IV. 36). Nachdem die zentralen Bereiche verschmolzen sind, fällt ein Teil dieses Gases in die neu entstandene Galaxie zurück und sammelt sich dort in einer Scheibe an (Abb. IV.37). Es ist durchaus plausibel, dass sich im Laufe der Zeit in diesem interstellaren Medium neue Sterne bilden, die dann eine Scheibenpopulation bildet, wie sie die Si-



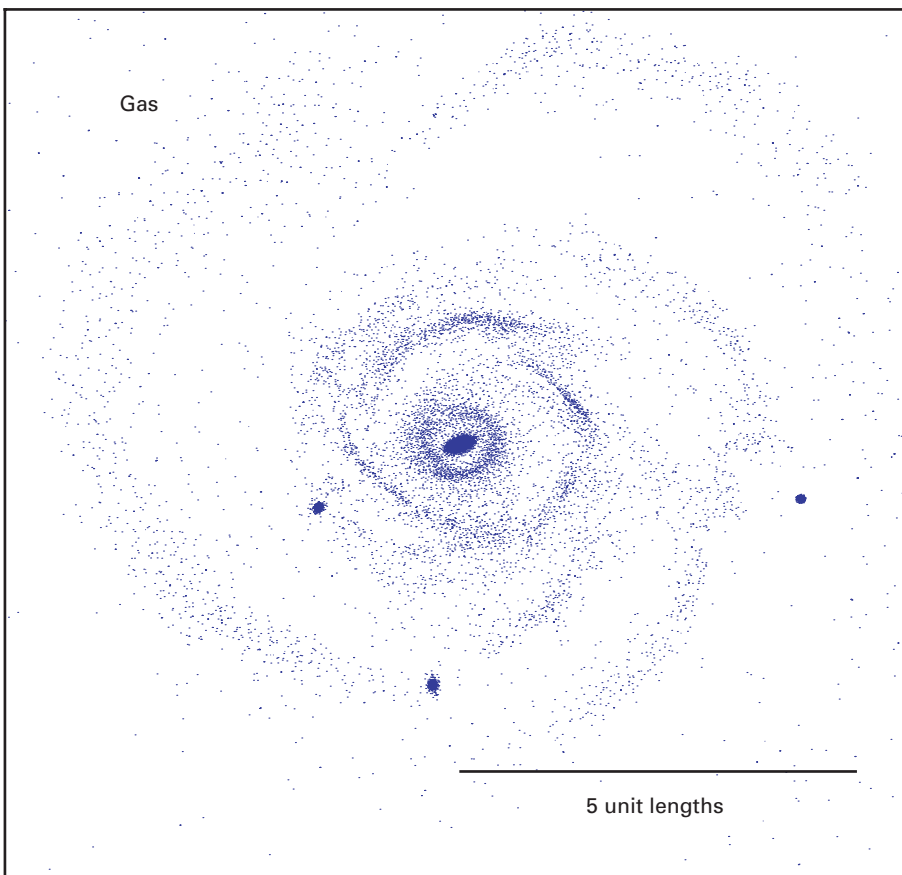
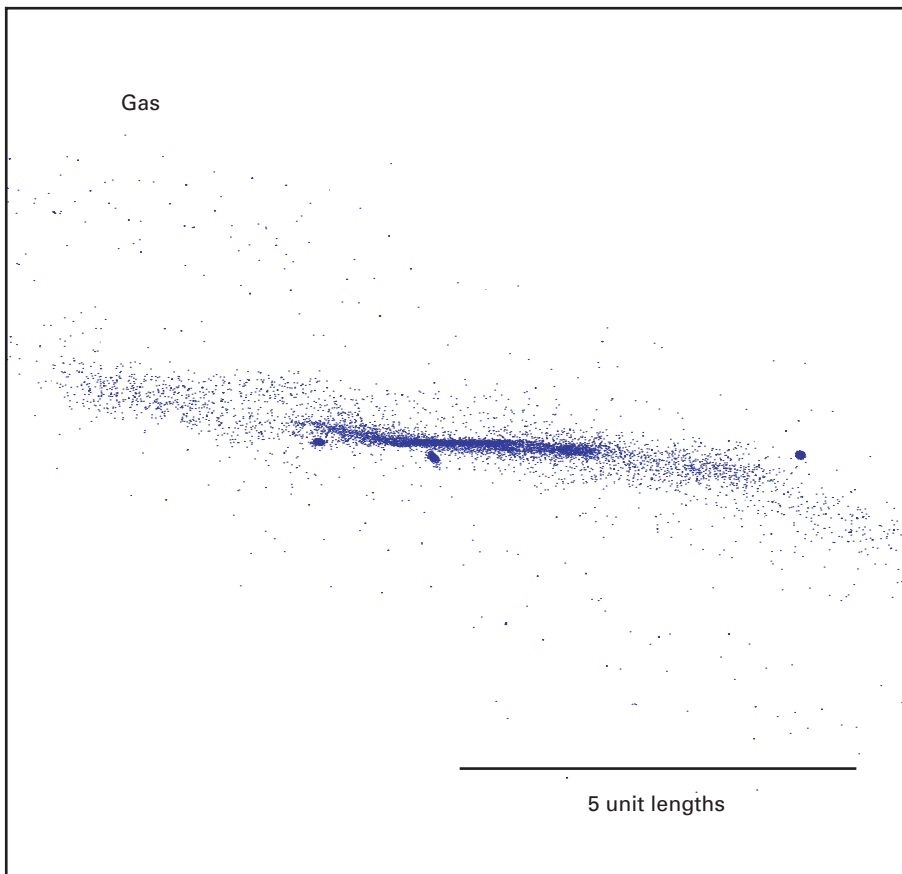


Abb. IV.37: Die Verteilung der Gasteilchen in einer zentralen Scheibe am Ende der Simulation. Oben die Seitenansicht, unten die Aufsicht.

mulationen fordern, und wie sie in einigen Fällen auch bereits beobachtet werden konnte.

Damit nimmt die Entstehung der Elliptischen Galaxien immer deutlichere Züge an. Dennoch gibt es eine Reihe von Aspekten, die weiter verfolgt werden müssen. So befinden sich in den Zentren zumindest einiger Elliptischer Galaxien Schwarze Löcher, die von einer Akkretionsscheibe umgeben sind. Hier entstehen zum Beispiel riesige Gasstrahlen – Jets, die sich bis über mehrere hundert Millionen Lichtjahre weit ins intergalaktische Medium erstrecken können (siehe den vorangehenden Beitrag über 3C 273). Eine interessante Frage ist daher, wie diese Schwarzen Löcher entstehen und auf welche Weise sie die Entstehung und Entwicklung Elliptischer Galaxien beeinflussen.

(Thorsten Naab, Andreas Burkert)

Dunkle Materie und Galaxienentstehung – ein ungelöstes Problem

Seit Jahrzehnten gehört die Dunkle Materie zum kosmologischen Standardmodell. Nach unserer heutigen Kenntnis trägt sie allein etwa ein Drittel zur Gesamtmasse im Universum bei. Obwohl die Natur der Dunklen Materie nach wie vor unklar ist, berücksichtigen Theoretiker sie und machen dabei bestimmte Annahmen über ihre Wechselwirkung mit der „normalen“ Materie. Dies betrifft insbesondere die Entstehung von Galaxien im jungen Universum. Theoretiker des Instituts haben gemeinsam mit Kollegen vom MPI für Astrophysik in Garching und der Carnegie Institution in Washington, USA, herausgefunden, dass sich der heutige Drehimpuls der Zwergspiralgalaxien nicht mit den Theorien der Galaxienentstehung erklären lässt. Diese Arbeit verdeutlicht einmal mehr grundsätzliche Defizite im Verständnis der Dunklen Materie und deren Rolle in der Entwicklung des Universums.

Hinweise auf die Existenz der Dunklen Materie kommen aus ganz unterschiedlichen Bereichen der Astronomie: Spiralgalaxien rotieren so schnell, dass sie von einem unsichtbaren Materiehalo umgeben sein müssen, der diese Sternsysteme mit ihrer Schwerkraft zusammenhält. Galaxien bewegen sich in Galaxienhaufen so schnell, dass sie von der Gravitationswirkung der Dunklen Materie in ihrem Verband gehalten werden müssen. Und nicht zuletzt lässt sich die Entstehung von Galaxien und Galaxienhaufen aus dem sehr homogenen Urgas nicht ohne die zusätzliche Gravitationswirkung von Dunkler Materie erklären.

Einen Teil der Dunklen Materie machen wahrscheinlich dunkle Himmelskörper aus, wie Braune Zwerge, Schwarze Löcher und sehr lichtschwache Sterne, die mit heutigen Teleskopen nicht nachweisbar sind. Der überwiegende Teil muss aber aus noch unbekannten Elementarteilchen bestehen. Sie müssen die Eigenschaften besitzen, keine oder nur sehr wenig elektromagnetische Strahlung auszusenden und zu absorbieren und mit der normalen, baryonischen

Materie nur über die Schwerkraft eine nennenswerte Wechselwirkung einzugehen.

Der Drehimpuls im Halo und in den Scheiben

Wenn man die Entstehung von Galaxien unter dem Einfluss der (nichtbaryonischen) Dunklen Materie simuliert, behandelt man diese daher wie ein Gas mit rein gravitativer Wechselwirkung. Solche Rechnungen haben folgendes Bild ergeben: In einem anfänglich nahezu homogenen Gemisch aus Dunkler und baryonischer Materie bildet die Dunkle Materie zunächst dichte Klumpen, die so genannten Dunklen Halos mit stark konzentrierten Kerngebieten. In diesen „Schwerkraftfallen“ sammelt sich dann die baryonische Materie an und verdichtet sich in den Zentralbereichen zu Galaxien. Die so entstandenen Galaxien sind dann immer noch von einem Halo aus Dunkler Materie umgeben.

In dieser frühen Phase kommt es auch immer wieder zu Wechselwirkungen und Verschmelzungen der Dunklen Halos miteinander. Zudem entstehen auf größeren Skalen dichte Filamente, die sich in Knotenpunkten schneiden, wo dunkle Halos besonders häufig miteinander verschmelzen. Bei den Verschmelzungsprozessen und durch Gezeitenwechselwirkungen wird auf die Halos Drehimpuls übertragen. Numerische Rechnungen zeigen, dass die interne Drehimpulsverteilung der dunklen Halos universell ist. Die Annahme ist nun, dass in dieser Phase Dunkle und baryonische Materie noch stark aneinander gekoppelt waren. Unter dieser Voraussetzung sollten das baryonische Gas und schließlich auch die entstandenen Spiralgalaxien theoretisch dieselbe Drehimpulsverteilung aufweisen wie die Halos aus Dunkler Materie.

Dieses Szenario erklärt viele der heutigen Eigenschaften von Spiralgalaxien, aber es gibt auch Widersprüche. So liefern Simulationen mit (kalter) Dunkler Materie Scheibengalaxien, die um mindestens eine Größenordnung zu klein sind. Man erklärt dies damit, dass die sichtbare Materie beim Einfall in die dunklen Halos Drehimpuls verliert, was aber offensichtlich nicht mit den Beobachtungen übereinstimmt. Das zweite Problem betrifft die heutige Dichteverteilung der Spiralgalaxien. Nimmt man an, dass der Drehimpuls des Gases erhalten bleibt, um die beobachtete Größe der Scheiben zu erklären, dann sollte nach den numerischen Rechnungen die heutige Dichteverteilung der Scheiben die ursprüngliche Drehimpulsverteilung der Protogalaxie widerspiegeln.

Diese grundlegende Voraussage der Theorie haben nun die Forscher des Instituts und Kollegen überprüft. Hierfür verwendeten sie gemessene Dichteverteilungen und Rotationskurven von 14 Zwergspiralgalaxien und berechneten daraus deren spezifische Drehimpulsverteilung. Diese Werte wurden nun mit den Vorhersagen der kosmologischen Rechnungen verglichen, wobei die Annahme gemacht wird, dass das Gas beim Einfall keinen Drehimpuls verliert. Wie Abb. IV.38 zeigt, passt die theoretische Ver-

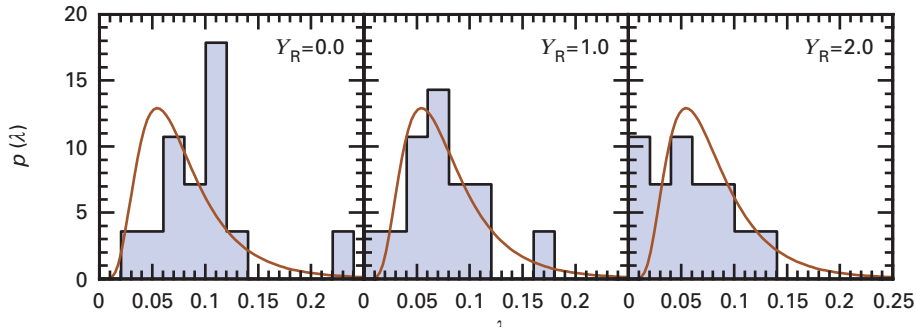


Abb. IV.38: Häufigkeitsverteilung des Drehimpulsparameters λ für die Werte 0, 1 und 2 (v.l.n.r.) des Verhältnisses Masse/Leuchtkraft. Mit wachsendem λ steigt der Anteil der Scheibe am gesamten Drehimpuls. Der eigentlich unphysikalische Grenzfall $\lambda = 0$ bedeutet lediglich, dass die Scheibe zum Gesamtdrehimpuls gar nicht beiträgt.

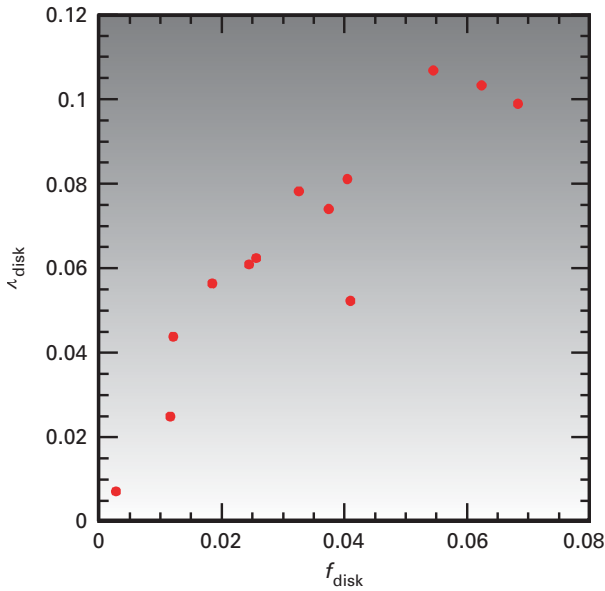


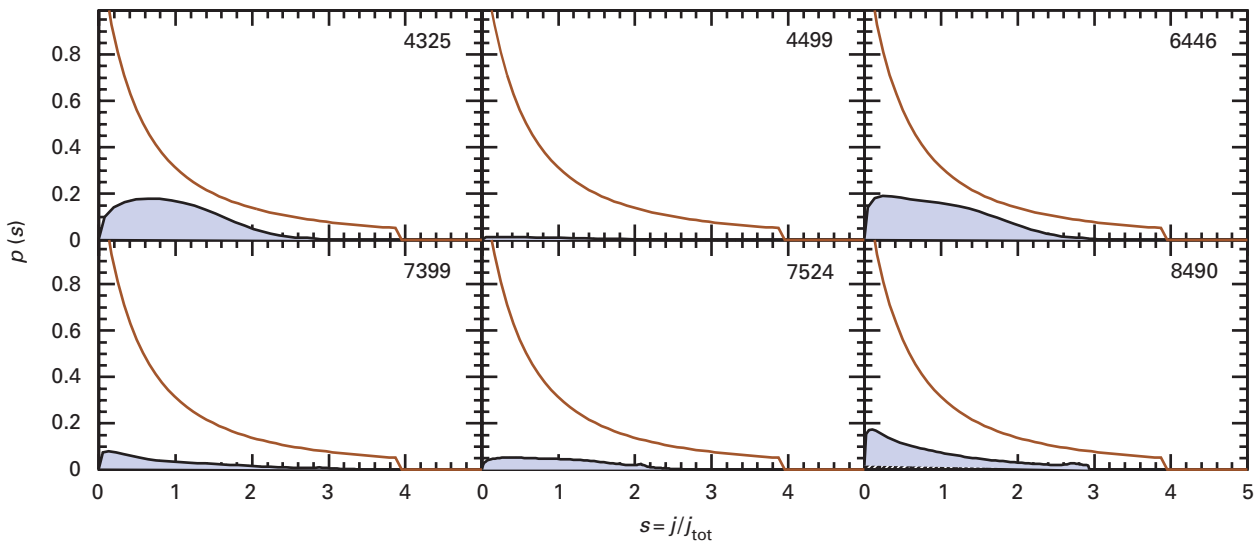
Abb. IV.39: Korrelation zwischen dem Drehimpulsparameter λ und dem Anteil der baryonischen Materie in der Scheibe.

teilung (durchgezogene Kurve) relativ gut mit den Beobachtungsdaten überein, wenn man für die Galaxien ein Verhältnis von Masse zu Leuchtkraft von eins bis zwei (mittleres und rechtes Diagramm) annimmt. (Der dimensionslose Parameter λ errechnet sich aus dem Gesamtdrehimpuls sowie aus Masse und Energie des Halos.)

Überraschenderweise zeigte sich eine sehr enge Korrelation des Drehimpulsparameters λ mit dem Anteil der baryonischen Materie in der Scheibe (Abb. IV.39). Anschaulich bedeutet dies, dass die Drehimpulsverteilung von der baryonischen Masse der Galaxien abhängt. Ein solches Verhalten ist aber im Rahmen der kosmologischen Theorie unverständlich.

Auf einen eklatanten Widerspruch zur Theorie stießen die Astrophysiker vor allem, als sie analysierten, wie der Drehimpuls in der Scheibe verteilt ist (Abb. IV.40). Die schraffierte Fläche kennzeichnet den Bereich der Drehimpulsverteilung in der jeweiligen Scheibe, die durchgezogene Kurve zeigt die Drehimpulsverteilung im Halo. Zum einen fällt hierbei auf, dass die gestrichelten Bereiche in allen Fällen kleiner sind als die Gesamtfläche unter den

Abb. IV.40: Häufigkeitsverteilung des Drehimpulses, normiert auf den Gesamtdrehimpuls. Die schraffierte Fläche kennzeichnet den Bereich der Drehimpulsverteilung in der jeweiligen Scheibe, die durchgezogene Kurve zeigt die Drehimpulsverteilung im Halo.



Kurven. Das bedeutet, dass der Anteil an baryonischer Materie in den Scheiben geringer ist als der Mittelwert im Universum. Zum anderen reicht die Drehimpulsverteilung im Halo zu größeren Werten als in den Scheiben. Das heißt, dass bei der Entstehung der Galaxien Materie mit dem höchsten Drehimpuls gar nicht in die Scheibe gelangt.

Das Problem besteht also kurz gesagt darin, dass der mittlere Drehimpuls der gesamten Scheibe relativ gut mit den Vorhersagen übereinstimmt (Abb. IV.38), die Drehimpulsverteilung in der Scheibe jedoch erheblich von der Theorie abweicht (Abb. IV.40).

Diese Abweichungen zwischen Beobachtung und Theorie könnten ihre Ursache prinzipiell auch in einer fehlerhaften Analyse der Beobachtungsdaten haben. So wäre es denkbar, dass ein Teil der Materie in Form von nicht nachweisbaren Braunen Zwergen und sehr lichtschwachen Sternen vorliegt. Diese Vermutung konnten die Forscher jedoch ausschließen, indem sie ihre Drehimpulsberechnungen der Galaxien mit wesentlich größeren Masse/Leuchtkraft-Verhältnissen wiederholten. Diese Versuche brachten keine signifikante Änderung. Denkbar wäre auch, dass man die Außenbezirke der Galaxien nicht mehr nachweisen kann und man so einen wichtigen Anteil des Drehimpulses übersieht. Doch auch diese Möglichkeit schlossen die Theoretiker aus: Gas jenseits des beobachteten Maximalradius kann zum Gesamtdrehimpuls nicht mehr als ein halbes Prozent beitragen. Wie aber lassen sich dann die neuen Ergebnisse im Rahmen des sonst sehr erfolgreichen kosmologischen Standardszenarios verstehen? Es gibt unterschiedliche Ideen, wie sich dieser Widerspruch vielleicht auflösen ließe. Zunächst einmal könnte die Dunkle Materie andere Eigenschaften haben als angenommen. Die Rechnungen berücksichtigen ausschließlich kalte Dunkle Materie, deren Teilchen geringe kinetische Energien besitzen. Seit wenigen Jahren wird aber auch darüber diskutiert, ob es auch warme Dunkle Materie mit höherer kinetischer Energie gibt. Ob diese Möglichkeit das Drehimpulsproblem lösen kann, müssen zukünftige numerische Simulationen zeigen.

Grundsätzlich denkbar wäre aber auch, dass sich die baryonische Materie schon in einer sehr frühen Phase der Galaxienentstehung von der Dunklen Materie abkoppelt und die Drehimpulse im Halo und in der Scheibe sich dann unterschiedlich entwickeln. Die Ursache hierfür ist jedoch unbekannt. Es ist offensichtlich, dass die Lösung des Drehimpulsproblems eine wesentliche Voraussetzung für ein echtes Verständnis der Galaxienentstehung ist.

(A. Burkert)

Der Himmelshintergrund im fernen Infrarot

Die Bedeutung astronomischer Beobachtungen im infraroten Spektralbereich wird künftig weiter zunehmen. Das in Bau befindliche europäische Weltraumteleskop HERSCHEL, an dessen Instrumentenentwicklung auch das MPIA beteiligt ist, ist nur ein Beispiel für diesen Trend. Untersuchungen lichtschwacher Objekte in diesem Spektralbereich werden jedoch durch eine flächige Hintergrundstrahlung gestört. Sie stammt von Quellen in unserem Planetensystem und in der Milchstraße, aber auch von fernen Galaxien. Astronomen des Instituts studierten gemeinsam mit Kollegen von der Universität Helsinki und dem Konkoly Observatorium Ungarn mit dem Instrument ISOPHOT an Bord des Infrarotobservatoriums ISO den Infrarothintergrund. Hierbei identifizierten sie Eigenschaften dieses diffusen Hintergrundes, die für künftige Infrarotteleskope von Bedeutung sein werden. Darüber hinaus stießen sie auf das schwache Signal der extragalaktischen Hintergrundstrahlung, die wahrscheinlich überwiegend von entstehenden Galaxien im frühen Universum stammt.

ISO hat durch mehrere leuchtende „Vorhänge“ hindurchgeschaut, die sich in ganz unterschiedlichen Entfernungen von der Erde befinden (Abb. IV.41). Da ist zunächst der interplanetare Staub im Sonnensystem. Da die

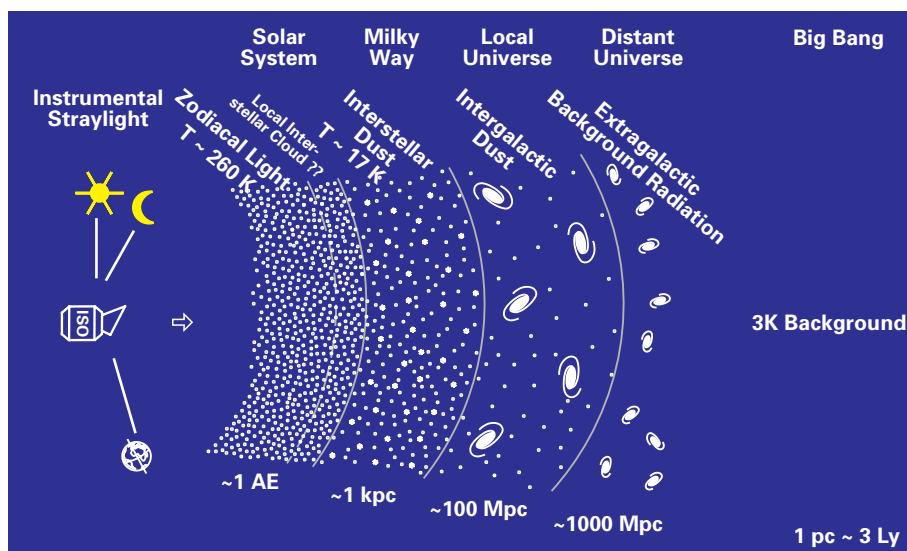


Abb. IV.41: Infrarotbeobachtungen entfernter Himmelskörper erfolgen durch mehrere Schichten hindurch. Die Staubemission im Planetensystem sowie innerhalb und außerhalb der Milchstraße trägt zu den registrierten Strahlungsflüssen stets mit bei.

ser mit 270 K vergleichsweise warm ist, ist seine Wärmestrahlung im mittleren Infrarot die stärkste Störquelle vor dem schwachen Hintergrundlicht. In wesentlich größeren Entfernungen von Hunderten oder Tausenden von Lichtjahren dehnt sich kühler interstellarer Staub aus. Er wird wegen seiner fedrigen, diffusen Erscheinung auch Zirkus genannt. Intergalaktischer Staub ist nur in Galaxienhaufen, und auch dort nur in ganz geringen Konzentrationen nachweisbar, wie Untersuchungen am MPIA zeigen konnten (vgl. den Abschnitt „Staub in Galaxienhaufen“ in diesem Jahresbericht).

Der extragalaktische Hintergrund konnte vor etwa zehn Jahren im fernen Infrarot mit dem amerikanischen Weltraumteleskop COBE nachgewiesen werden. Das hierauf befindliche Instrument DIRBE besaß jedoch nur eine sehr geringe Auflösung von 42 Bogenminuten und war nicht in der Lage, Einzelquellen auszumachen. Mit ISOPHOT konnten Astronomen des Instituts diese schwache Strahlung ebenfalls nachweisen. Sie stammt von jungen Galaxien, die mehrere Milliarden Lichtjahre entfernt sind.

Es gibt nur noch eine weiter entfernte Quelle, die der kosmischen 3K-Hintergrundstrahlung. Sie hat ihr Maximum allerdings im Millimeterbereich und stammt aus einer sehr frühen Phase, wenige hunderttausend Jahre nach dem Urknall. Diese Strahlung hat COBE am gesamten Himmel genau vermessen.

„Confusion noise“ – ein grundlegendes Problem der Infrarotastronomie

Diese unterschiedlichen Komponenten des Infrarot-hintergrunds stellen für die Infrarotastronomie ein grundlegendes Problem dar, weil sie sich allen Beobachtungen überlagern und die Genauigkeit bei der Intensitätsbestimmung der Strahlung astronomischer Objekte begrenzen. Dieses „Confusion noise“ (zu Deutsch etwa Verwechslungsrauschen) lässt sich bei Infrarotaufnahmen auf folgende Weise erfassen: Bei der Beobachtung eines Objekts werden abwechselnd Aufnahmen des Himmelsgebietes mit dem Körper (on target) und abseits davon (off target) gewonnen. Die Off-target-Aufnahme dient als Referenz, um die Intensität des Himmelshintergrundes, der überwiegend durch die Emission von galaktischem Staub (Zirkus) ver-

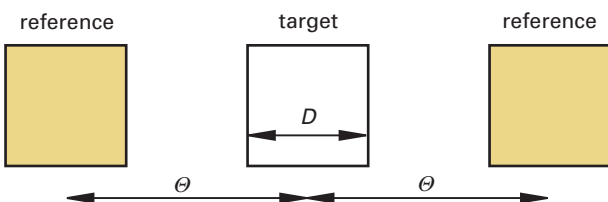
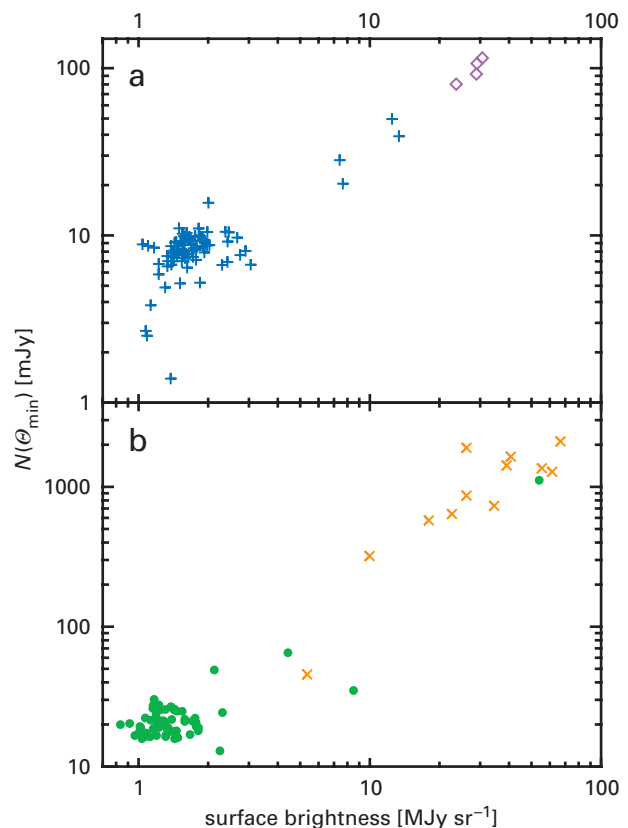


Abb. IV.42: Infrarotaufnahmen erfolgen abwechselnd „on target“ (Mitte) und als Referenz „off target“. Die Größe der Messapertur D und der Winkel α zwischen den Aufnahme-feldern spielen beim Hintergrundrauschen eine wichtige Rolle.

ursacht wird, zu bestimmen. Er wird anschließend von der On-target-Aufnahme abgezogen (Abb. IV. 42). Die ersten Untersuchungen des Confusion noise wurden Anfang der 1990er Jahre anhand von Aufnahmen des Infrarotsatelliten IRAS durchgeführt. Damals stellte man fest, dass die räumliche Verteilung der Hintergrundstrahlung eine Art fraktales Muster zeigt: Die Strukturen ähneln sich auf unterschiedliche Größenskalen. Auf der Basis der IRAS-Daten bei 100 μm Wellenlänge leitete man mit zusätzlichen theoretischen Annahmen eine analytische Beziehung zwischen dem Confusion noise und der Teleskopöffnung (Winkelauflösung), der Wellenlänge und der absoluten Intensität des Hintergrundes ab. Anschaulich leuchtet es zum Beispiel durchaus ein, dass mit steigender Auflösung des Teleskops die beugungsbegrenzten Gesichtsfelder (Airy-Scheibchen) kleiner werden und damit die On-target- und Off-target-Felder näher beieinander liegen können. Damit lässt sich in diesem Fall der Hintergrund genauer bestimmen als bei größerem Abstand. Außerdem scheint es plausibel, dass ein heller Hintergrund, verursacht durch eine dichtere interstellare Wolke, auch mehr Struktur besitzt als ein schwacher und somit das confusion noise vergrößert.

Mit ISO sollte diese zum Teil theoretisch hergeleitete Beziehung nun erstmals mit Beobachtungsdaten überprüft und auf größere Wellenlängen ausgedehnt werden. Hierzu wählten die Forscher des Instituts aus dem ISO-Katalog 175 Kar-

Abb. IV.43: Abhängigkeit des Confusion noise von der Hintergrundhelligkeit.



ten mit sehr unterschiedlicher Hintergrundhelligkeit aus, die keine offensichtlichen Quellen, wie Sterne, Galaxien oder Nebel, enthielten. Aus ihnen wurde zunächst das Zodiaklicht subtrahiert. Abschließend erfolgte eine gründliche Analyse des Instrumentenrauschens, das ebenfalls von den Daten abgezogen wurde. Auf das verbliebene Signal wurde nun eine Fourier-Analyse angewandt, mit der sich die Anzahl der Hintergrundstrukturen in Abhängigkeit von ihrer Größe ermitteln lässt. Diese Größe N steigt tatsächlich, wie theoretisch vorhergesagt, mit der Intensität des Hintergrundes (mit der Potenz 1.5) an (Abb. IV.43). Das gilt sowohl für Wellenlängen um $100\ \mu\text{m}$ (Abb. oben) als auch um $200\ \mu\text{m}$ (unten).

Sehr aufschlussreich ist ein direkter Vergleich mit den theoretischen Vorhersagen. Wie aus Abb. IV.44 ersichtlich, stimmen die theoretischen Werte zumindest im Bereich oberhalb von etwa $10\ \text{mJy}$ sehr gut mit den ISO-Daten überein (die gestrichelte Gerade kennzeichnet den Verlauf identischer Werte). Zudem hat die Analyse eindeutig gezeigt, dass selbst in Himmelsbereichen mit sehr schwacher Hintergrundstrahlung das Instrumentenrauschen um das Zwei- bis Dreifache niedriger ist als das Confusion noise. Selbst bei der maximalen Wellenlänge von $200\ \mu\text{m}$ war die Detektorempfindlichkeit durch die Fluktuationen des Himmels hintergrundes begrenzt, und nicht von instrumentellen Effekten. Dies bestätigt erneut die Qualität der erstmalig auf ISO geflogenen Detektoren, die vom Institut gemeinsam mit deutschen und europäischen Firmen entwickelt wurden.

Die Untersuchungen des Hintergrundrauschens haben also weitgehend die theoretischen Vorhersagen bestätigt, diese können nun bei der Arbeit mit zukünftigen vergleichbar großen Weltraumteleskopen wie SIRTf (Start 2003) und Astro-F (2005) angewandt werden. Dies ist von ent-

scheidender Bedeutung, um die Messgenauigkeit dieser Teleskope zu bestimmen. Offen musste aber die Frage bleiben, wie sich die mit der Größe des Teleskopspiegels ansteigende Winkelauflösung auf das Confusion noise auswirkt, denn ISO und IRAS besaßen beide einen 60-cm -Spiegel. Vorhersagen für das 3.5-m -Teleskop HERSCHEL basieren daher auf zusätzlichen theoretischen Annahmen.

Die extragalaktische Hintergrundstrahlung

Auffällig an Abb. IV.44 ist ein Abweichen der Messwerte von der theoretischen Vorhersage bei sehr geringen Intensitäten unterhalb von etwa $10\ \text{mJy}$. In diesem Bereich der geringsten Helligkeit verlaufen die Messpunkte plötzlich auf nahezu konstantem Niveau. Die Fluktuationen werden nun nicht mehr von Zirkus, sondern von fernen Galaxien verursacht. Dies interpretieren die Forscher als Signal der extragalaktischen Hintergrundstrahlung, die – anders als der Zirkus – isotrop über den Himmel verteilt ist.

Aus einer genauen Analyse dieses Strahlungsanteils ließen sich mit einer Genauigkeit von 30% die relativen Fluktuationsamplituden zu $7\ \text{mJy}$ und $15\ \text{mJy}$ bei $90\ \mu\text{m}$ bzw. $170\ \mu\text{m}$ Wellenlänge bestimmen. Mit Hilfe eines kosmologischen Modells zur Entstehung von Galaxienhaufen konnten diese Werte in Absolutwerte der Intensität umgerechnet werden. Die erhaltenen Werte von $14\ \text{nW m}^{-2}\ \text{sr}^{-1}$ für $90\ \mu\text{m}$ Wellenlänge und eine obere Grenze von $37\ \text{nW m}^{-2}\ \text{sr}^{-1}$ bei $170\ \mu\text{m}$ passen zu den mit COBE gewonnenen Werten. Bereits vor zwei Jahren konnte aus Galaxienzählungen mit ISOPHOT eine untere Grenze für die Hintergrundstrahlung abgeleitet werden. Sie liegt um einen Faktor sieben unter den jetzigen oberen Grenzen.

Diese Beobachtung ist in verschiedener Hinsicht bemerkenswert. Sie bedeutet eine unabhängige Bestimmung des extragalaktischen Hintergrunds. Ziel bleibt aber, die absolute Intensität auch ohne ein kosmologisches Modell zu ermitteln. Hierfür müssen alle Vordergrundsignale korrekt subtrahiert werden. Dieser Absolutwert ist eine wesentliche Information, um die Entwicklung der Galaxien im frühen Universum zu studieren. Diese Aufgabe wird das Team demnächst angehen.

(C. Kiss, P. Ábrahám, U. Klaas, D. Lemke)

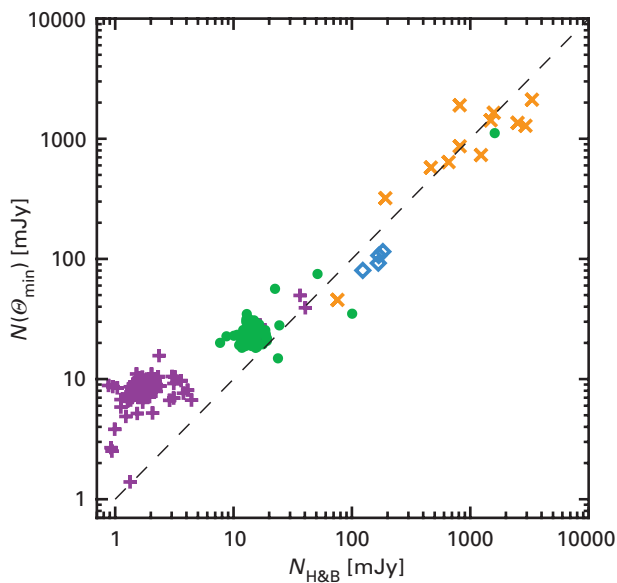


Abb. IV.44: Vergleich des gemessenen Confusion noise (Ordinate) mit der theoretischen Vorhersage.

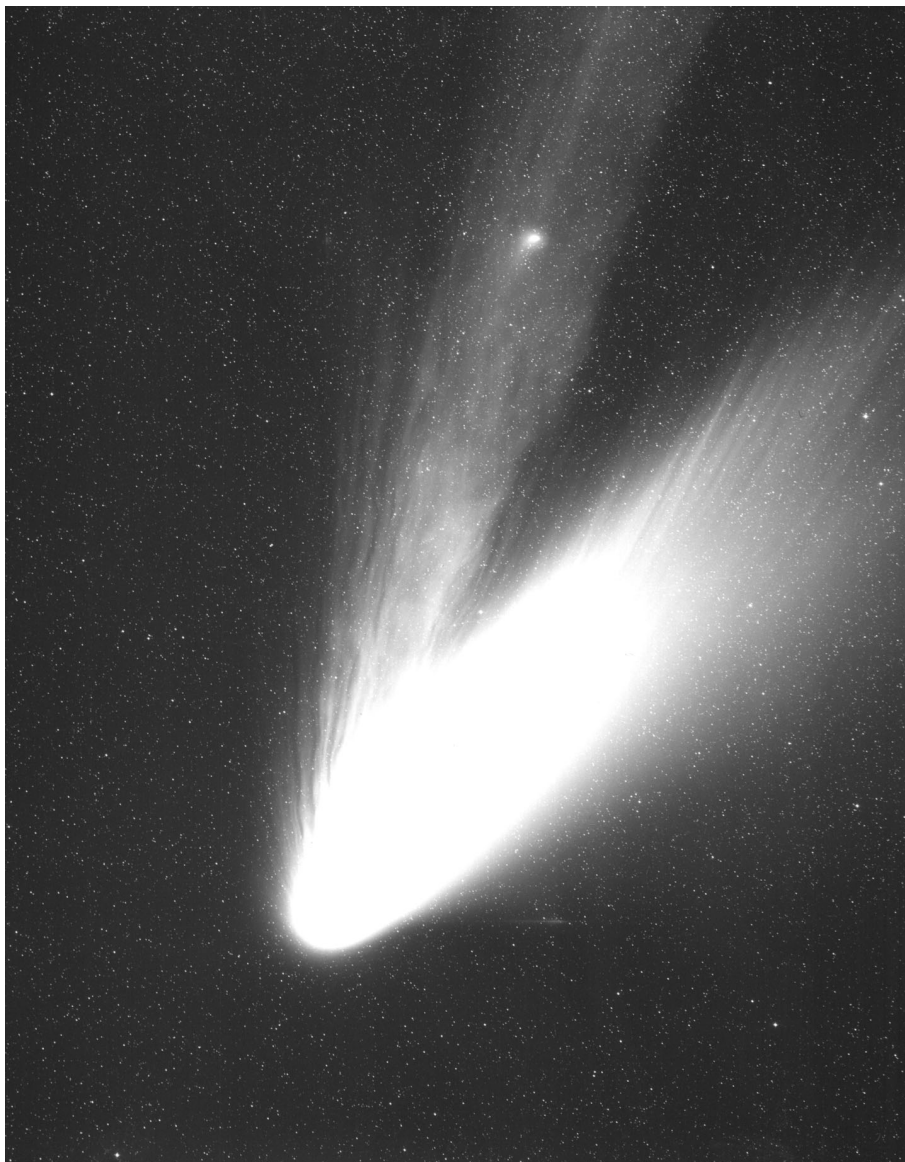
IV.3 Das Sonnensystem

Iso beobachtet Staub und Eis beim Kometen Hale-Bopp

Im Jahre 1995 entdeckten die Amateurastronomen Hale und Bopp einen neuen Kometen. Im Frühjahr 1997 erreichte er eine maximale Helligkeit von -0.5 mag und blieb sieben Wochen lang heller als 0. Größe. Damit gehörte Komet C/1995 O1 (Hale-Bopp) zu den hellsten Kometen des 20. Jahrhunderts. Es war ein glücklicher Zufall, dass während seines Erscheinens das europäische Infrarotobservatorium Iso gerade arbeitete. Diese günstige Gelegenheit nutzte ein internationales Astronomenteam, um den Kometen mit Iso zu beobachten. Dabei zeigte

sich, dass Hale-Bopp selbst in großen Entfernungen von der Sonne eine ungewöhnlich hohe Staubproduktion hatte. Es ergaben sich zudem Aussagen über die Natur und die Größenverteilung der Teilchen.

Abb. IV.45: Komet Hale-Bopp im Frühjahr 1997



Als Hale-Bopp im Juli 1995 entdeckt wurde, befand er sich noch in einer sehr großen Entfernung von 7.15 AE von der Sonne. Am 1. April 1997 erreichte er sein Perihel und bewegte sich anschließend wieder in die Außenbereiche des Sonnensystems (Abb. IV.45). Hale-Bopp zeigte eine Vielzahl spektakulärer Phänomene, wie Jets und Striae. Letzteres sind selten auftretende helle Streifen im Schweif, die mit dem Schmidt-Teleskop auf dem Calar Alto beobachtet werden konnten (s. Jahresbericht 1997, S. 75). Der Kometenkern war mit einem Durchmesser von 40 km bis 70 km ungewöhnlich groß.

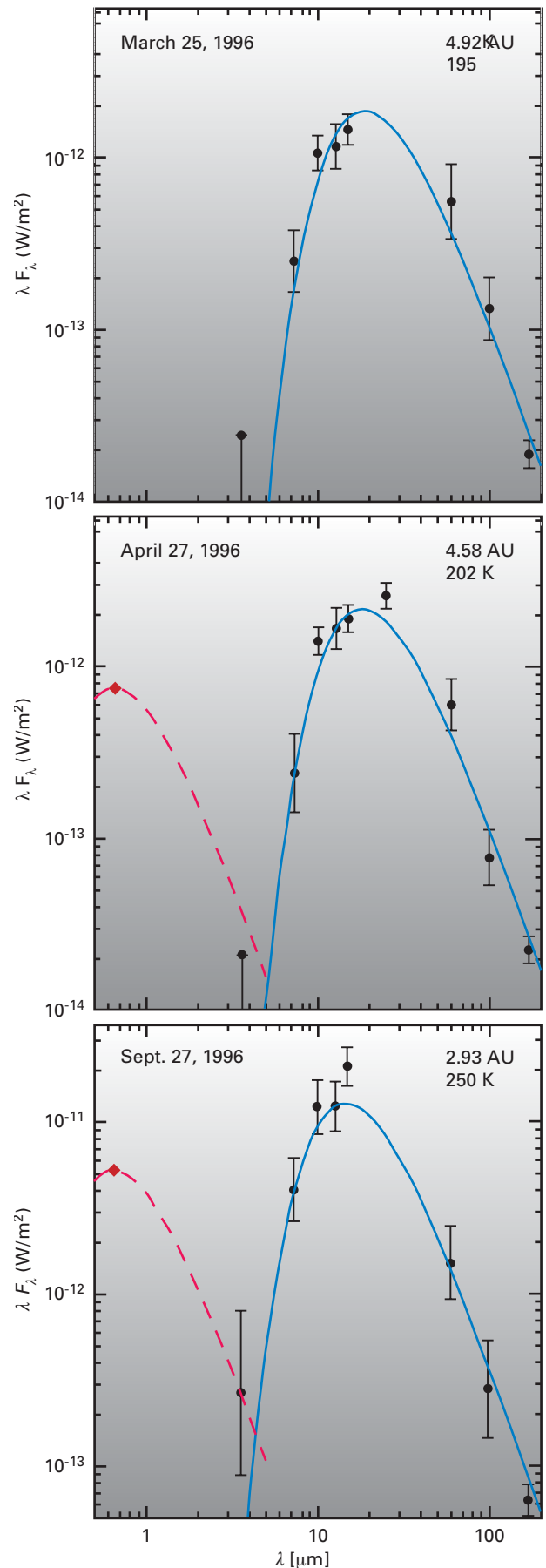
Staub und Eis in Hale-Bopps Koma

Schon bald nach der Entdeckung war klar, dass dieser Komet sehr hell werden würde. Damit eignete er sich ideal dazu, seine Entwicklung über einen längeren Zeitraum hinweg auch im fernen Infrarot zu verfolgen. In diesem Spektralbereich wird die Emission von Staub und Eis beobachtbar. Diese Strahlung gibt Aufschluss über verschiedene Aktivitätsphasen bei Kometen und über die Teilchen in der Koma. Insofern liefern solche Beobachtungen auch Informationen über den Aufbau des Kometenkerns.

Es ist bekannt, dass in großer Sonnenentfernung zunächst das leicht flüchtige CO-Gas aus dem Kern sublimiert und dabei Staub mitreißt. So entsteht die Koma. Je mehr sich der Komet der Sonne nähert, desto wärmer wird er. Dadurch sublimiert zunehmend auch Wasser aus dem Kern und dominiert schließlich den gasförmigen Massenverlust des Körpers.

Um diese Phasen bei Hale-Bopp zu beobachten, standen drei Beobachtungsfenster zur Verfügung: März bis Mai 1996 (Entfernung zur Sonne 4.9 bis 4.6 AE), September/Oktober 1996 (2.9 bis 2.8 AE) und Dezember 1997/Januar 1998 (3.9 AE, nach dem Periheldurchgang). In diesen Zeiträumen waren mit dem am MPIA entwickelten Instrument ISOPHOT Beobachtungen im gesamten Wellenlängenbereich von 3.6 μm bis 170 μm möglich. Vervollständigt wurde dieser Datensatz mit Messwerten der anderen Instrumente auf ISO sowie mit optischen Beobachtungen vom Erdboden aus bei 0.7 μm . Dem multi-instrumentellen Ansatz entsprechend war auch das Astronomenteam sehr umfangreich. Neben Forschern der Max-Planck-Institute für Kernphysik und Astronomie (Heidelberg) sowie für Aeronomie (Katlenburg-Lindau) waren Astronomen der ESO, aus den USA, Frankreich, Großbritannien und Tschechien beteiligt.

Abb. IV.46: Spektrale Energieverteilung der Emission des Kometen Hale-Bopp bei 4.92, 4.58 und 2.93 AE Abstand zur Sonne. Deutlich erkennbar ist der Anstieg der Farbtemperatur von 195 auf 250 K (durchgezogene Kurve). Die gestrichelte Kurve kennzeichnet den Anteil des vom Staub gestreuten Sonnenlichts mit einer Schwarzkörper-Temperatur von 5700 K.



Das Projekt verfolgte im Wesentlichen drei Fragen:

- Wie entwickelt sich die Wärmestrahlung in Abhängigkeit von der Entfernung zur Sonne?
- In welcher Entfernung dominiert in der Koma Wasser gegenüber CO?
- Wie ändern sich die Staubeigenschaften in Abhängigkeit von der Entfernung zur Sonne?

In einem ersten Schritt wurde aus den sorgfältig kalibrierten Messwerten die spektrale Energieverteilung der Kometenkoma in Abhängigkeit vom Sonnenabstand erstellt. Abb. IV.46 zeigt exemplarisch drei solche Verteilungen für die Entfernung 2.93 AE, 4.58 AE und 4.92 AE. In erster Näherung lassen sich an diese Daten Planck-Kurven eines Schwarzen Körpers anpassen und daraus die

Farbtemperaturen bestimmen. Diese ist jedoch nicht identisch mit der physikalischen Temperatur der Staubteilchen. Die thermische Emission einzelner Partikel hängt nämlich sowohl von deren Temperatur als auch von deren Abstrahlungsfähigkeit, der so genannten Emissivität, ab. Diese wiederum ist eine Funktion des Materials und der Teilchengröße. Die Staubkoma enthält nun Teilchen ganz unterschiedlicher Größe, Zusammensetzung und Temperatur. Die gemessene Energieverteilung im Infraroten ist die Strahlungssumme ganz unterschiedlicher Teilchen: Aus der spektralen Energieverteilung lassen sich die Eigenschaften der Teilchen einzugrenzen.

Die ermittelten Farbtemperaturen wurden nun mit derjenigen eines hypothetischen rotierenden Schwarzen Körpers verglichen, dessen Temperatur mit der Sonneneinstrahlung im Gleichgewicht ist. Interessanterweise ist die gemessene Farbtemperatur unabhängig von der Entfernung um etwa 50 % höher als die Schwarzkörpertemperatur. Das ist der höchste, jemals gemessene Wert. Er deutet an, dass sich in der Koma besonders viele kleine Körnchen befinden müssen. Diese können bei großen Wellenlängen, die etwa hundertmal so groß sind wie der Teilchendurchmesser, ihre Wärme nicht mehr effizient abstrahlen und erwärmen sich daher stärker als ein Schwarzer Körper.

Die stark erhöhte Farbtemperatur selbst in der großen Entfernung von 4.9 AE war für die Forscher sehr überraschend. Sie hatten erwartet, dass die Staubpartikel in Eisteilchen eingeschlossen sind und beim Sublimieren von CO-Gas mit in die Koma gerissen werden. Die Daten belegen aber, dass feiner Staub in größeren Mengen auch frei vorhanden sein muss. Gleichzeitig lässt sich aus der Form der Planck-Kurve bei großen Wellenlängen ersehen, dass es auch größere Partikel geben muss. Das heißt, in der Koma scheint eine Staubpopulation mit einer breiten Größenverteilung existiert zu haben. Für das Vorhandensein größerer Staubmengen spricht auch eine weitere Beobachtung: In den spektralen Energieverteilungen sind deutlich überhöhte Werte um 10 μm und 25 μm Wellenlänge zu erkennen. Diese werden auf Silikate zurückgeführt. Es ist das erste Mal, dass man diese Minerale in derart großer Entfernung von der Sonne in einer Kometenkoma nachweisen konnte.

Wie ein Vergleich der Daten ergab, variierte die Farbtemperatur mit dem Sonnenabstand r proportional zu $r^{-0.5}$ und die insgesamt abgestrahlte Energie mit r^{-3} . Theoretisch lässt sich zeigen, dass die Energie mit r^{-4} variiert, wenn die Staubproduktionsrate proportional zur Intensität des einfallenden Sonnenlichts steigt. Dieses Verhalten hat man in der Vergangenheit bei vielen Kometen beobachtet, zum

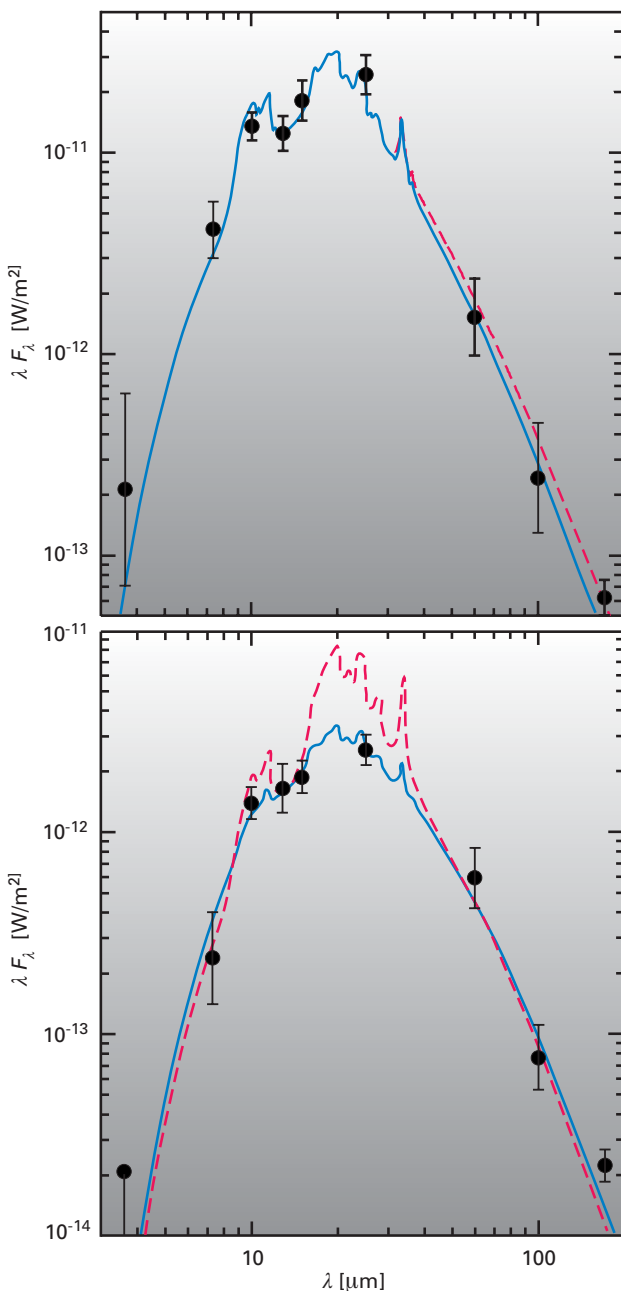


Abb. IV.47: Vergleich des Staubmodells mit den ISOPHOT-Daten. Bei 2.8 AE Sonnenentfernung **(a)** geben beide Modelle mit etwas unterschiedlichen Teilchengrößenverteilung die Daten gut wieder. Bei 4.6 AE **(b)** ergibt erst eine verringerte Silikathäufigkeit (durchgezogen) gute Übereinstimmung.

Beispiel bei Komet Halley. Die Staubproduktion stieg demnach bei Hale-Bopp bei seiner Annäherung an die Sonne weniger stark an als bei anderen Kometen, zumindest im Abstandsbereich von 4.6 AE und 2.8 AE. Dies ist eine Folge der ungewöhnlich hohen Staubaktivität bereits in sehr großer Entfernung.

Um mehr über die Eigenschaften der Teilchen in der Koma zu erfahren, wurde ein Modell aufgestellt, dessen Strahlungseigenschaften möglichst gut die beobachtete Energieverteilung wiedergeben. Nach einigem Probieren erwies sich eine Mischung aus 75 % glasartigem Pyroxen und 10 % glasartigem Olivin sowie 15 % kristallinem Olivin (Forsterit) als am geeignetsten. In die Größenverteilung der Teilchen gehen drei Größen ein, deren Werte aus der besten Anpassung an die Messdaten folgten. Dies sind: der minimale Radius von $0.1 \mu\text{m}$, der am häufigsten auftretende Radius von $0.42 \mu\text{m}$ und der Exponent $N = 3.7$, der die Form der Verteilungskurve bestimmt. Ein Wert $N < 4$ bedeutet, dass die großen Teilchen den größten Anteil zur gesamten Stabmasse beisteuern.

Wie Abb. IV.47 zeigt, gibt dieses Modell die Messwerte vom 7. Oktober 1996 (links), als Hale-Bopp 2.8 AE von der Sonne entfernt war, sehr gut wieder. Bei den Werten vom 27. April (rechts), als Hale-Bopp noch 4.6 AE entfernt war, sagt das Modell (gestrichelt) hingegen eine viel zu hohe Silikatemission voraus. Erst wenn man bei derselben Größenverteilung den relativen Anteil der Silikatkomponente um einen Faktor drei verringert, stimmen Theorie und Beobachtung gut überein.

Aus den gemessenen Infrarotflüssen ließ sich nun mit Hilfe des Modells auch die Staubproduktion berechnen. Als unbekannte Parameter gehen hierbei die mittlere Dichte der Teilchen (Annahme: 1 g/cm^3) sowie die Maximalgröße (Annahme: 1 cm) ein. Mit diesen Werten ergaben sich Staubmengen von $1.5 \times 10^5 \text{ kg/s}$ (bei 2.8 AE) über $5 \times 10^4 \text{ kg/s}$ (bei 3.9 AE) bis $3 \times 10^4 \text{ kg/s}$ (bei 4.6 AE). Das bedeutet ein Massenverhältnis von Staub zu Gas von etwa sechs. Diese Werte passen gut zu älteren Submillimeter-Beobachtungen, die eine Rate von $2 \times 10^6 \text{ kg/s}$ bei 1 AE ergeben hatten. Insbesondere die ungewöhnlich hohe Rate in großer Entfernung war, wie bereits gesagt, überraschend. Es wird daher in Zukunft reizvoll sein, weitere möglichst helle Kometen in großer Sonnenentfernung zu entdecken und detailliert zu untersuchen.

Interessant ist bei Kometen auch die Frage nach Wassereisteilchen. Beobachtungen im optischen und im UV-Bereich hatten schon früher für Hale-Bopp eine Wasserproduktion von etwa $2 \times 10^{28} \text{ Mol}$ pro Sekunde ergeben. In den ISOPHOT-Daten finden sich Hinweise auf die Existenz von Wassereisteilchen, die sich durch erhöhte Emission bei $44 \mu\text{m}$ und $65 \mu\text{m}$ Wellenlänge bemerkbar machen. Aus der Wasserproduktionsrate und der gemessenen thermischen Emission lässt sich die Gesamtmasse an Wassereis abschätzen, wobei die unbekannte typische Teilchengröße die Güte der Abschätzung begrenzt. Für einen typischen Radius von $15 \mu\text{m}$ ergeben sich $2 \times 10^{10} \text{ kg}$, für $100 \mu\text{m}$ etwa $2 \times 10^{11} \text{ kg}$. Außerdem ließ sich den Daten

entnehmen, dass die Eisteilchen wenige Grad wärmer waren als die ihnen entsprechende Schwarzkörper-Temperatur. Dies lässt sich damit erklären, dass die Eispartikel mit geringen Mengen an Staub verunreinigt sind. Dadurch erwärmen sie sich effektiver als reines Eis.

Diese umfangreiche Analyse hat das Potenzial von Kometenbeobachtungen im fernen Infrarot eindrucksvoll demonstriert. Ob zukünftige Weltraummissionen, wie HERSCHEL (Start 2007), ähnlich erfolgreich verlaufen werden, lässt sich derzeit nicht sagen, denn Kometen von der Helligkeit eines Hale-Bopp erscheinen selten. Auf jeden Fall werden diese Teleskope wegen ihrer im Vergleich zu ISO größeren Spiegel (HERSCHEL: Durchmesser 3.5 Meter, ISO: 0.6 Meter) wesentlich empfindlicher sein. Damit ließen sich die jetzt als besonders interessant erkannten Messungen in noch größeren Abständen zur Sonne durchführen.

(Ch. Leinert, D. Lemke, M. Stickel)

Personal

In Heidelberg

Direktoren: Rix, Henning (ab 1.11.)

Wissenschaftliche Mitarbeiter: Abraham (bis 22.4.), Andersen (ab 15.11.), Bailer-Jones, Beetz, Birkle, Burkert, Dehnen, Feldt, Fried, Graser, Grebel, Haas, Heraudeau, T. Herbst, Hotzel (ab 1.7.), Jester (ab 15.9.), Hippelein, Hofferbert, Klaas, Kümmel (bis 2.12.), Leinert, Lemke, Lenzen, Ligori, Marien, Meisenheimer, Mundt, Naab, Neckel, Odenkirchen, Olivier (bis 28.8.), Phleps (ab 1.10.), Röser, Slyz (bis 30.6.), Stauder, Stickel, Toth (ab 15.10.), Vavrek (ab 1.9.), Wolf, Wilke

Doktoranden: Bertschik (ab 1.3.), Büchler (ab 1.7.), Brunner (ab 1.9.), Dib, Geyer, Harbeck, Hartung, Heitsch (bis 30.6.), Hempel (ab 1.8.), Hetznecker (bis 14.3.), Hotzel (bis 14.4.), Jesseit, Jester (bis 14.9.), Khochfar, Kleinheinrich (bis 31.3.), Kovács (ab 1.11.), Kranz, Krause, Krdzalic (bis 28.2.), Lamm, Lang, Maier, McIntosh (15.1. bis 30.6.), Mühlbauer, Ofek (29.1. bis 4.3.), Phleps (bis 30.9.), Przygodna, Puga, Rudnick (bis 14.11.), Sarzi (1.7. bis 30.11.), Schuller (bis 14.2.), Stolte, Walcher (ab 1.11.), Weiss, Wetzstein (ab 1.2.), Ziegler (ab 1.10.)

Diplomanden: Bertschik (bis 28.2.), Tschamber (ab 24.4.), Walcher (bis 31.7.), Wetzstein (bis 31.1.), Ziegler (bis 30.6.), Zimer (ab Juni). Diplomanden von der FH Mannheim: S. Müller (1.3. bis 31.8.), Mohr (ab 1.9.).

Studentische Hilfskräfte: Drepper (ab 1.3.), Egnér (ab 15.11.), Tschamber (ab 15.11.), Zimer (ab 15.8.).

Wissenschaftliche Dienste: Bizenberger, Galperine (ab 18.6.), Grözingen, Hofferbert, Laun, Mathar, Neumann, Quetz.

Rechner, Datenverarbeitung: Briegel, Helfert, Hiller, Hippler, Rauh, Storz, Tremmel, Zimmermann.

Elektronik: Alter, Becker, Ehret, Grimm, Klein, Mall (ab 1.9.), Ridinger, Salm, Töws (1.2.-31.7.), Unser, Wagner, Werner (bis 30.9.2000), Westermann, Wrhel.

Feinwerktechnik: Böhm, Haffner (ab 1.9.), Heitz, Meister, Meixner, Morr, Pihale, Sauer

Konstruktion: Baumeister, Ebert, Münch, Rohloff

Photolabor: Anders-Özcan

Graphik: Meißner-Dorn, Weckauf

Bibliothek: Behme (freigestellt ab 1.10.), Dueck (ab 1.7.)

Verwaltung: Apfel, Flock (freigestellt), Gieser, Goldberger, Kellermann, Hartmann, Heißler, Janssen-Bennynck, Kellermann, Papousado, Schleich, Voss, Zähringer.

Sekretariat: Goldberger, Janssen-Bennynck, Rushworth (bis 31.7.), Silventoinen (ab 1.7.)

Technischer Dienst und Kantine: Behnke, Gatz (bis 30.4.), Herz, M. Jung (ab 15.2.), Lang, Nauss, B. Witzel, F. Witzel, Zergiebel.

Auszubildende: Feinwerktechnik – Fabianatz (bis 4.3.), Greiner (bis 4.3.), Haffner (bis 31.8.), Lares, Maurer (ab 1.9.), Rosenberger (1.9.), Sauer (1.9.), Petri, Wesp (bis 31.8.); Konstruktion – K. Jung (bis 6.2.), Bender (ab 1.9.)

Freier Mitarbeiter: Dr. Thomas Bührke.

Stipendiaten: Butler (ab 15.1.), Caldwell (ab 26.4.), Chesneau (ab 1.10.), Cretton (bis 30.9.), Del Burgo, D'Onghia (ab 1.12.), Heitsch (1.7. bis 30.9.), Hetznecker (1.9. bis 31.10.), Kessel (DFG), Klessen (Otto-Hahn-Preis, bis 30.9.), Kroupa (bis 31.1.), Lee (ab 1.11.), Nelson, Pentericci, Popescu (Otto-Hahn-Preis, bis 31.8.), Travaglio (bis 30.9.).

Gäste: Abraham, Ungarn (Juli), Avila, Mexiko (November–Dezember), Bodenheimer, USA (Dezember), Böker, USA (Mai), Cicieliag, Polen (August–September), Devriendt/Frankreich (März–April), Dodt, Deutschland (Juni), Dong, USA (Juni–Juli), Gallagher, USA (Juni–August), Gupta, Indien (November), B. Herbst, USA (Juni), Hiroshita, Japan (Oktober), Holtzman, USA (Mai), Hozumi, Japan (Mai), Ionita, USA (August–September), Kiss, Ungarn (Januar, September), Klapp, USA (Dezember), Lin, USA (April–Mai), Looze, USA (Juni–August), MacLow, USA (Juli), Makarova, Russland (November), Mellema, Niederlande (Mai–Juni), Mochizuki, Japan (Mai), Morel, Frankreich (April–Dezember), Morgan, USA (Juni–Juli), O'Dell/USA (Januar–März), Ofek, Israel (Januar–März, Juni – August), Sanchez, Mexiko (November–Dezember), Schechter, USA (Juni–August), Shields, USA (Juli–August), Smith, UK (September), Steinmetz, Deutschland (Mai–Juni), T'oth/Ungarn (Juni–August), Vitvitska, Russland (Juni–August), Zuther, Deutschland (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: Adelman (9.4. – 12.4.), P. Brunner (ab 1.9.), Egnér (20.8. – 30.9.), Eiermann (19.2. – 23.2.), Enbrecht (1.3. – 31.8.), F. Geyer (3.9. – 28.9.), Harth (ab 17.9.), Link (bis 28.2.), Marquart (5.3. – 8.4.), Miller (20.6. – 19.8.), Rohlf (12.3. – 22.4.), Schmitt (1.3. – 31.8.), Tamas (20.8. – 2.11.), Tristram (6.8. – 19.8., 17.9. – 30.9.)

Calar Alto/Almeria

Lokale Leitung: Gredel, Vives

Astronomie, Koordination: Thiele, Prada, Frahm.

Astronomie, Nachtassistenten: Aceituno, Aguirre, Alises, Guijarro, Hoyo, Montoya (bis 30.11.), Pedraz

Teleskoptechnik: Capel, De Guindos, García, Helmling, Henschke, L. Hernández, Raul López, Morante, W. Müller, Nunez, Parejo, Schachtebeck, Usero, Valverde, Wilhelmi.

Technischer Dienst, Hausdienst: A. Aguila, M. Aguila, Ariza, Barón, Carreno, Corral, Dominguez, Gómez, Góngora, Klee, Rosario López, Marquez, Martinez, F. Restoy, Romero, Saez, Sanchez, Schulz (bis 30.6.), Tapia.

Verwaltung, Sekretariat: M. Hernández, M. J. Hernández, M. I. López, C. Restoy (bis 31.5.).

Arbeitsgruppen und wissenschaftliche Zusammenarbeit

Instrumentelle Arbeiten

Adaptive Optik

Stefan Hippler, M. Feldt, M. Kasper, R.-R. Rohloff, K. Wagner, sowie alle Abteilungen des MPIA und des Calar-Alto-Observatoriums, in Zusammenarbeit mit MPI für extraterrestrische Physik, Garching, ESO, Garching, Osservatorio Arcetri, Italien, Steward Observatory, Arizona, USA.

CONICA

Rainer Lenzen, H. Becker, P. Bizenberger, A. Böhm, M. Hartung, W. Laun, Meixner, N. Münch, R.-R. Rohloff, C. Storz, K. Wagner, in Zusammenarbeit mit MPI für extraterrestrische Physik, Garching.

LAICA

Joseph Fried, H. Baumeister, W. Benesch, F. Briegel, U. Graser, B. Grimm, Klein, K. Marien, R.-R. Rohloff, C. Unser, K. Zimmermann.

MIDI

Christoph Leinert, Uwe Graser, A. Böhm, B. Grimm, T. Herbst, W. Laun, R. Lenzen, S. Ligori, R. Mathar, K. Meisenheimer, W. Morr, U. Neumann, E. Pitz, F. Przygodda, R.-R. Rohloff, P. Schuller, C. Storz, K. Wagner, K. Zimmermann, in Zusammenarbeit mit ASTRON, Dwingeloo, Universität Amsterdam, Sterrewacht Leiden, Observatoire de Paris-Meudon, Observatoire de la Côte d'Azur, Nice, Kiepenheuer-Institut Freiburg, Thüringer Landessternwarte Tautenburg.

OMEGA 2000

Hermann-Josef Röser, C. Bailer-Jones, M. Alter, H. Baumeister, P. Bizenberger, A. Böhm, B. Grimm, W. Laun, U. Mall, R.-R. Rohloff, C. Storz, K. Zimmermann.

PACS für HERSCHEL

Dietrich Lemke, V. Galperine, U. Grözinger, R. Hofferbert, U. Klaas, R. Vavrek, H. Baumeister, A. Böhm, unter Federführung des MPI für extraterrestrische Physik, Garching in Zusammenarbeit mit: DLR, Berlin, Universität Kaiserslautern.

LUCIFER und LINC für das LBT

R. Lenzen, Tom Herbst, H.-W. Rix, H. Baumeister, P. Bizenberger, B. Grimm, W. Laun, Ch. Leinert, R.-R. Rohloff, unter Federführung der Landessternwarte Heidelberg.

LINC -NIRVANA für das LBT

T. Herbst, R. Ragazzoni, H.-W. Rix, P. Bizenberger, D. Andersen, R.-R. Rohloff, H. Baumeister, in Zusammenarbeit mit der Universität Köln und dem Osservatorio Astrofisico di Arcetri.

ISOPHOT-Datenzentrum

Dietrich Lemke, Isophot-PI und die ISO-Gruppe des MPIA: C. del Burgo Diaz, M. Haas, P. Heraudeau, S. Hotzel, C. Kiss, U. Klaas, O. Krause, M. Stickel, R. Vavrek, K. Wilke.

MIRI für NGST

Dietrich Lemke, Th. Henning, U. Grözinger, R. Hofferbert, R.-R. Rohloff, K. Wagner.

Wissenschaftliche Arbeiten

Entwicklungsphasen von Globulen

Roland Gredel, in Zusammenarbeit mit: Armagh Observatory, UK, MPI für Radioastronomie, Bonn, Joint Astronomy Center, Hawaii, Universität Helsinki, Finnland, ESO, Chile.

Interstellarer Eisstaub

U. Klaas, D. Lemke in Zusammenarbeit mit: Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte Jena, Konkoly Observatorium, Budapest, Ungarn.

Doppelsterne

Ch. Leinert, T. Herbst, A. Burkert in Zusammenarbeit mit: Thüringer Landessternwarte, Tautenburg, University of California, San Diego, USA, Universität Kiel.

Chemische Entwicklung der Milchstraße

C. Travaglio, A. Burkert in Zusammenarbeit mit: Osservatorio Astrofisico Arcetri, Italien.

Entferntester Quasar

Laura Pentericci, Hans-Walter Rix in Zusammenarbeit mit: Institute of Advanced Study und Princeton University Observatory, Princeton, USA, Space Telescope Science Institute, Baltimore, USA, University of California, Davis, USA, LLNL, Livermore, USA, Pennsylvania State University, USA, Johns Hopkins University, Baltimore, USA, Apache Point University, New Mexico, USA, University of Chicago, USA, Astrophysikalisches Institut Potsdam, ESO, Chile.

COMBO 17

Christian. Wolf, Klaus Meisenheimer, A. Borch, S. Phleps, H.-W. Rix, H.-J. Röser, in Zusammenarbeit mit: Astronomisches Institut der Universität Bonn, Physikalisches Institut der Universität Potsdam, Institute of Physics, Oxford, Institute of Astronomy, Edinburgh, Imperial College, London.

Das tiefste Bild im Infraroten

Gregory Rudnick, Hans-Walter Rix in Zusammenarbeit mit: Sterrewacht Leiden und Kaptyn Institut, Groningen, NL, ESO, Garching, Caltech, Pasadena, USA., Space Telescope Science Institute, Baltimore, USA.

Staub in Galaxienhaufen

Manfred Stickel, U. Klaas, D. Lemke in Zusammenarbeit mit: Universität Helsinki, Finnland.

Der Jet von 3C273

Sebastian Jester, H.J. Röser, K. Meisenheimer in Zusammenarbeit mit: NRAO, New Mexico, USA, Jodrell Bank Observatory, Cheshire, UK.

Spiralsysteme im Innern von elliptischen Galaxien

Thorsten Naab, A. Burkert.

Himmelshintergrund im Fernen Infrarot

C. Kiss, P. Abraham, U. Klaas, D. Lemke in Zusammenarbeit mit: Konkoly Observatorium, Budapest, Ungarn, Universität Helsinki, Finnland.

Dunkle Materie

Andreas Burkert in Zusammenarbeit mit: MPI für Astrophysik, Garching, Carnegie Institution, Washington, USA.

ISO-Beobachtungen von Komet Hale-Bopp

Christoph Leinert, D. Lemke, M. Stickel und das ISO-Datenzentrum in Zusammenarbeit mit: MPI für Kernphysik, Heidelberg, MPI für Aeronomie, Katlenburg-Lindau, JPL, Pasadena, USA, ESO, Chile, University of Arizona, Texas, USA, Observatoire de Paris, Frankreich, Pennstate University, USA; Laboratoire d'Astrophysique Spatiale, Marseille, Frankreich, Space Telescope Science Institute, Baltimore, USA, MIT, Cambridge, USA, Universität Prag, CZ, University of Kent, UK.

Nicht in diesem Jahresbericht behandelte Arbeiten

PRIME – Ein NIR-Durchmusterungssatellit

D. Lemke, R. Lenzen, H.-W. Rix in einer internationalen Zusammenarbeit.

NGST – Next Generation Space Telescope

D. Lemke, Th. Henning, Grözing, Hofferbert, R.-R. Rohloff in einer internationalen Zusammenarbeit.

Jets von jungen Sterne

Reinhard Mundt in Zusammenarbeit mit: Osservatorio Astronomico di Arcetri, Firenze, Dublin Institute of Advanced Studies, Thüringer Landessternwarte, Tautenburg, Landessternwarte Heidelberg.

Nachweis von interstellarem CN

R. Gredel in Zusammenarbeit mit: Universität Paris, Universität Toledo/USA

Scheiben um Pulsare

M. Haas in Zusammenarbeit mit: CEA, Saclay, Frankreich, Universität Oxford, UK), Universität Exeter, UK.

Die Auswirkungen von Gasverlust auf gebundene Sternhaufen

M. Geyer, A. Burkert.

Bestimmung stellarer Größen mit GAIA

C.A.L. Bailer-Jones, in Zusammenarbeit mit dem GAIA Science Team.

Spektroskopie von Kugelsternhaufen in NGC 1399

Eva Grebel in Zusammenarbeit mit: Universidad de Concepcion, Chile, Universität Texas, USA, Universidad Catolica, Chile, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, Lick Observatory, USA, Observatorio Astronomico Cordoba, Argentinien.

Spektroskopische Untersuchung des Kugelsternhaufens Palomar 5

M. Odenkirchen, E. Grebel, W. Dehnen, H.-W. Rix in Zusammenarbeit mit ESO, Chile, Yerkes-Observatorium, USA.

Doppel- und Mehrfach-Sternhaufen in der Großen Magellanschen Wolke

E. Grebel in Zusammenarbeit mit Universität und Institut für Photogrammetrie, Bonn.

CADIS – Calar Alto Deep Imaging Survey

K. Meisenheimer, J. Fried, H. Hippelein, B. v. Kuhlmann, Ch. Leinert, S. Phleps, H.-W. Rix, H.-J. Röser, Ch. Wolf

Kosmologische Entwicklung verschmelzender Galaxien

S. Khochfar, A. Burkert.

Zusammenarbeit mit Firmen

Calar-Alto-Observatorium

DSD Dillinger Stahlbau GmbH, Saarlouis
PEP Modular Computers GmbH, Kaufbeuren

LAICA

Filtrop AG, Balzers Liechtenstein
Reichmann Feinoptik, Brokdorf

OMEGA 2000

Börsig, Neckarsulm
Compumess Elektronik, Unterschleißheim
Comtronic GmbH, Heiligkreuzsteinach
Cryophysics, Darmstadt, Deutschland
EBJ, Ladenburg
EBV-Elektronik, Leonberg
EFH, Neidenstein
ERNI, Adelberg
Haecker, Weinsberg, Deutschland
Horst Göbel, Ludwigshafen
HTF Elektro, Mannheim
Huber + Suhner, Taufkirchen
Janos, Townshend, USA
Knief GmbH, Karlsruhe
Kugler, Salem, Deutschland
Lemo Elektronik, München
MSC Vertriebs-GmbH, Stutensee
Nies Electronic, Frankfurt
Pfeifer, Asslar, Deutschland
Reinhold Halbeck, Offenhausen
Riekert & Sprenger, Wertheim
Rittal-Werk, Herborn
Roland Häfele Leiterplattentechnik, Schriesheim
Scantec, Planegg
Spoerle Electronic, Dreieich
Swissoptic, Herrbrugg, Schweiz
Tower Electronic Components, Schriesheim
Varian, Darmstadt, Deutschland

MIDI

AMI Doduco GmbH
AMS, Martinsried
B.E.S.T. Ventile und Fittinge GmbH
Baumer electric, Friedberg
BOC Edwards GmbH
Börsig, Neckarsulm
Colder Products GmbH
Cryophysics GmbH
Drollinger GmbH
Edmond Industrie Optik, Karlsruhe
Faber Industrietechnik, Mannheim
Ferrofluidics, Nürtingen
Gerwah Präzisions GmbH, Grosswallstadt
Gutekunst, Metzingen

GVL Croengineering GmbH
Hommel Werkzeuge, Viernheim
Infrared Labs, Tucson, USA
Infrared Multilayer Laboratory, University of Reading
ISOLOC, Stuttgart
KOBOLD Messring GmbH
Leybold Vakuum GmbH
Linos Photonics, Göttingen
Melles-Griot, Bensheim
Merck Eurolab, Bruchsal
Metallschleiferei Christoph Höhn
Mörz Metallbearbeitungs GmbH
Newport, Darmstadt
OCLI, Santa Rosa, USA
Pfeiffer Vacuum GmbH
Poligrat GmbH
Polytec, Waldbrunn
Präzisionsoptik Gera, Gera
RETEC Instruments, Idstein
SHI Cryogenics Europe GmbH
Sky Blue, München
Taylor-Hobson, Wiesbaden
VSYSTEMS, München
Wiebusch, Volkmarsen
Witzenmann GmbH

CONICA

Walpa, Walldorf, Deutschland
Cryophysics GmbH, Darmstadt, Deutschland
Janos, Townshend, Vermont, USA
Leybold, Hanau, Deutschland
Nosta GmbH, Höchstädt, Deutschland

PRIME

Kayser-Threde, Bremen
Focus Software Inc., Tucson, USA

PACS

Agilent (früher Hewlett-Packard), Böblingen
ANTEC, Kelkheim
Astrum Friedrichshafen
Buerklin, München
Comtronic GmbH, Heiligkreuzsteinach
CryoVac Tieftemperaturtechnik, Troisdorf
Cryophysics GmbH, Darmstadt
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit, Darmstadt
GSF Forschungszentrum, Unterschleißheim
GVL Cryoengineering, Stolberg
Hensoldt AG, Wetzlar
Hopt GmbH, Schömberg
Hoschar, Karlsruhe

Hy-Line Power Components, Unterhaching
IMEC Leuven/Belgien
Kayser-Threde, München
Mattke Servotechnik, Freiburg
Messer-Griesheim, Ludwigshafen
National Instruments, München
Oxford Instruments, Wiesbaden
Polytec GmbH, Waldbronn
Rohde & Schwarz, Neu-Isenburg
SAR Systemsolution, Ottobrunn
Scientific Instruments, Gilching
Stöhr Armaturen, Augsburg
Tektronix, Köln
Vacuumschmelze, Hanau
Zeiss, Oberkochen

CCD-Technik

Dataman, Pliezhausen
EEV Ltd., GB
Heraeus, Hanau
ITOS GmbH, Mainz
Lockheed Martin Fairchild Syst., USA
Micro-Optronic-Messtechnik, Langebrück
New Focus, Santa Clara, USA
Roth, Karlsruhe
Schäfter+Kirchhoff, Hamburg
Schott Mainz
SITe Corp., Beaverton, Oregon, USA
Steward Observatory, Tucson, Arizona, USA
Stöhr Armaturen, Augsburg
Tafelmeier, Rosenheim

Rechnerausstattung

AKRO, Unterschleißheim
asknet, Karlsruhe
Additive, Friedrichsdorf
Bechtle, Heilbronn
Cancom, Frankfurt
Creaso, Gilching
Danes, Frankfurt
DELL, Langen
Edo, Hockenheim
Gordion, Troisdorf
h-soft, Stuttgart
INMAC, Mainz
ISPD, Poing
Kippdata, Bonn
LANTEC, Planegg
PROUT, Darmstadt
PTC, Mannheim
Rufenach, Heidelberg
Schulz, München
Scientific Computers, Aachen
Sun, Langen
Transtec, Tübingen

Werkstätten

ABB (ehem. Hartmann + Braun), Alzenau	Geier Metalle, Mannheim	Physik Instrumente, Waldbronn
Almet-AMB, Mannheim	GLT, Pforzheim	Phytec Meßtechnik, Mainz
Amphenol-Tuchel Electronics, Heilbronn	Gould Nicolet Meßtechnik, Dietzenbach	Phytron, Gröbenzell
Angst+Pfister, Mörfelden	Grandpair, Heidelberg	Plastipol, Runkel
APE Elektronik, Kuppenheim	Gutekunst, Gutekunst	PSI Tronix, Tulare, California, USA
Auer Paul GmbH, Mannheim	Halm+Kolb, Stuttgart	Püschel Elektronik, Mannheim
Best Power Technology, Erlangen	Heidenhain, Traunreut	RED. Regional-Electronic-Distribution, Rodgau-Jügesheim
Binder Magnete, Villingen-Schwenningen	Hilma-Römheld GmbH, Hilchenbach	Radiall, Rödermark
Bohnenstiel, Heidelberg	Helukabel, Hemmingen	Rau-Meßtechnik, Kelkheim
Böllhoff, Winnenden	Hema, Mannheim	Räder Gangl, München
Börsig, Neckarsulm	Herz, Leister Geräte, Neuwied	Reeg, Wiesloch
Bubenzer Bremsen, Kirchen-Wehrbach	Hewlett-Packard Direkt, Böblingen	Reinhold Halbeck, Offenhausen
Bürklin, München	HM Industrieservice, Waghäusel	Reith, Mannheim
C&K Components, Neuried b. München	Hommel-Hercules Werkzeughandel, Viernheim	Retronic, Ronneburg
C.A.P. CNC+Coating Technik, Zell. a. H.	Hormuth, Heidelberg	Rieker & Sprenger, Wertheim
CAB, Karlsruhe	Horst Göbel, Ludwigshafen	Rittal-Werk, Herborn
Cadillac-Plastic, Viernheim	Horst Pfau, Mannheim	Roland Häfele Leiterplattentechnik, Schriesheim
Carl Roth, Karlsruhe	HOT Electronic, Taufkirchen	Roth, Karlsruhe
Cherry Mikroschalter, Auerbach	HTF Elektro, Mannheim	RS Components, Mörfelden-Walldorf
Coating-Plast, Schriesheim	Huber + Suhner, Taufkirchen	RSP-GmbH, Mannheim
Com Pro, Stuttgart	Hummer+Rieß, Nürnberg	Rudolf, Heidelberg
Compumess Elektronik, Unterschleißheim	IBF Mikroelektronik, Oldenburg	Rütgers, Mannheim
Comtronic GmbH, Heiligkreuzsteinach	Infrared Labs, Tucson, USA	Rufenach Vertriebs-GmbH, Heidelberg
Conrad Electronic, Hirschau	Inkos, Reute/Breisgau	Rutronik, Ispringen
Cryophysics, Darmstadt	iSystem, Dachau	Sartorius, Ratingen
Dannewitz, Linsengericht	Jacobi Eloxal, Altlusheim	Sasco, Putzbrunn
DMG-Service, Pfronten	Jarmyn, Limburg	Scantec, Planegg
Delta, Wuppertal	Joisten+Kettenbaum, Bergisch Gladbach	Schaffner Elektronik, Karlsruhe
Dürkes & Obermayer, Heidelberg	Kaufmann, Crailsheim	Schuricht, Fellbach-Schmidlen
Dyna Systems NCH, Mörfelden-Walldorf	Kerb-Konus-Vertriebs-GmbH, Amberg	Schweizer Elektroisierungsstoffe, Mannheim
EBARA Pumpen, Dietzenbach	Kniel, Karlsruhe	SCT Servo Control Technology, Taunusstein
EBJ, Ladenburg	Knürr, München	SE Spezial-Electronic, Bückeburg
EBV-Elektronik, Leonberg	Lambda Electronics, Achern	Seifert mtm Systems, Ennepetal
EC Motion, Mönchengladbach	Lemo Elektronik, München	Siemens IC-Center, Mannheim
Edsyn Europa, Kreuzwertheim	LPKF CAD/CAM Systeme, Garbsen	Spaeter, Viernheim
EFH, Neidenstein	Macrotron, München	Spindler & Hoyer, Göttingen
Eldon, Büttelborn	Mankiewicz, Hamburg	Spoerle Electronic, Dreieich
Elna Transformatoren, Sandhausen	Matsuo Electronics Europe, Eschborn	Stäubli, Bayreuth
elspec, Geretsried	Matsushita Automation, Holzkirchen	SUCO-Scheuffele, Bietigheim-Bissingen
ELV Elektronik, Leer	Maxim Ges. f. elektronische integrierte Bausteine, Planegg	Synatron, Hallbergmoos
ERNI, Adelberg	Menges electronic, Dortmund	Tandler, Brauen
eurodis Enatechnik, Quickborn	Metrofunkabel-Union, Berlin	Thorlabs, Gruenberg
EWf, Eppingen	Mitsubishi-Electric, Weiterstadt	TMS Test- und Meßsysteme, Herxheim/Hayna
Farben Specht, Bammental	MSC Vertriebs-GmbH, Stutensee	Tower Electronic Components, Schriesheim
Faber, Mannheim	MTI, Baden-Baden	TreNew Electronic, Pforzheim
Farnell Electronic Components, Deisenhofen	Munz, Lohmar	TS-Optoelectronic, München
Farnell Electronic Services, Möglingen	Nanotec, Finsing	TWK-Elektronik, Karlsruhe
FCT Electronic, München	Newport, Darmstadt	Vacuumschmelze, Hanau
Fels Spedition, Heidelberg	Nickel Schalt- und Meßgeräte, Villingen-Schwenningen	VBE Baustoff+Eisen, Heidelberg
Fisba, St. Gallen	Nies Electronic, Frankfurt	Vero Electronics, Bremen
Fischer Elektronik, Lüdenscheid	Noor, Viernheim	W. & W. Schenk, Maulbronn
FPS-Werkzeugmaschinen GmbH, Otterfing	Nova Elektronik, Pulheim	Wikotec, Bramsche
Franke, Aalen	Oberhausen, Ketsch	Wilhelm Gassert, Schriesheim
Fritz Faulhaber, Schönaich	Otto Faber, Mannheim	WS CAD Elektronik, Berk Kirchen
Future Electronics Deutschland, Unterföhring	OWIS GmbH, Staufen	Witter GmbH, Heidelberg
Ganter, Walldorf	Parametric Technology, Muenchen	WIKI, Klingenberg
	Parcom, CH-Flurlingen	
	pbe Electronic, Elmshorn	
	Pfeiffer, Mannheim	

Lehrveranstaltungen

Sommersemester 2001

- J. W. Fried, B. Fuchs: Galaxien (Vorlesung)
 K. Meisenheimer: Radiogalaxien (Vorlesung)
 H.-J. Röser: Kosmologische Testbeobachtungen (Vorlesung)
 U. Klaas: Ultra- und hyperleuchtkräftige Infrarotgalaxien (Vorlesung)
 M. Stickel: Astrophysikalische Datenanalyse (Vorlesung)
 Ch. Leinert, D. Lemke, R. Mundt, H.-M. Schmid, W. M. Tscharnuter, P. Ulmschneider: Einführung in die Astronomie und Astrophysik III (Seminar)
 Ch. Leinert, E. Gehlken, J. Krautter, H. Görgemanns, P. Ulmschneider: Geschichte der Astronomie (Seminar)
 A. Burkert, B. Fuchs, A. Just, H.-W. Rix, R. Spurzem, R. Wielen: Stelldynamik (Seminar)
 Die Dozenten der Astronomie: Astronomisches Kolloquium

Wintersemester 2001/2002

- W. Dehnen: Gravitationslinsen: Konzepte und Anwendungen in der Astronomie (Vorlesung)
 W. J. Duschl, D. Lemke, R. Mundt, H. J. Röser, W. M. Tscharnuter: Einführung in die Astronomie und Astrophysik III (Seminar)
 A. Burkert, B. Fuchs, A. Just, H.-W. Rix, R. Spurzem, R. Wielen: Struktur, Kinematik und Dynamik von Sternsystemen (Seminar)
 J. Kirk, K. Meisenheimer: Teilchenbeschleunigung und Strahlungsprozesse in Radiogalaxien (Seminar)
 Die Dozenten der Astronomie: Astronomisches Kolloquium

Teilnahme an Tagungen, wissenschaftliche und öffentliche Vorträge

- Workshop on „Dwarf Galaxies and Their Environment“, Bad Honnef, Januar: E.K. Grebel (eingeladener Übersichtsvortrag)
 Seminar, University of Hertfordshire, England, Januar: L. Pentericci (eingeladener Vortrag)
 Vom Ursprung der Welt, Fachhochschule Regensburg, Januar: H.-W. Rix (Vortrag)
 ISO Calibration Legacy Conference, Vilspa, Spanien, Februar: P. Ábraham, P. (Vortrag)
 ISO Calibration Legacy Conference, Vilspa, Spanien, Februar: C. del Burgo (Vortrag, 2 Poster)
 Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spanien, Februar: C. del Burgo (eingeladene Vorträge)
 American Association for the Advancement of Science, San Francisco, USA, Februar: E. K. Grebel (eingeladener Übersichtsvortrag)
 ISO Calibration Legacy Conference, Vilspa, Spanien, Februar: P. Héraudeau (Vortrag, Poster), U. Klaas (eingeladener Vortrag), D. Lemke (eingeladener Vortrag)
 Massive Black Holes from $z = 0.001$ to $z = 4.5$, University of Cambridge, Februar: H.-W. Rix (eingeladener Vortrag)
 Massive Black Holes from $z = 0.001$ to $z = 4.5$, University of Oxford, Februar: H.-W. Rix (eingeladener Vortrag)
 ISO Calibration Legacy Conference, Vilspa, Spanien, Februar: K. Wilke (Vortrag)
 The atmospheres of ultracool dwarfs, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, März: C. A. L. Bailer-Jones
 Variability and rotation in ultracool dwarfs, Zentrum für Astronomie und Astrophysik, Technische Universität, Berlin, März: C. A. L. Bailer-Jones

- The Dark Universe, Baltimore, MA, USA, März: A. Burkert (eingeladener Vortrag)
- IAU Symposium 207 über „Extragalactic Star Clusters“, Pucón, Chile, März: E. K. Grebel (eingeladender Übersichtsvortrag)
- SDSS Collaboration Meeting, Chicago, USA, März: E. K. Grebel (Plenarvorträge)
- Astronomisches Kolloquium, Universität Bonn und MPIfR, März: S. Jester (eingeladener Vortrag)
- Astronomische Großgeräte, Potsdam, März: D. Lemke
- SDSS General Collaboration Meeting, Chicago, USA, März/April: L. Pentericci
- IAU Symposium 207, Extragalactic Star Clusters, Pucon, Chile, März: A. Stolte (Poster)
- INAOE, Mexico, April: C. del Burgo (eingeladener Vortrag)
- Kolloquium, University of Wisconsin, Madison, USA, April: E. K. Grebel
- Planetarium Stuttgart, April: E. K. Grebel (öffentlicher Vortrag)
- OPTICON Board Meeting, Catania, Italien, April: R. Gredel
- Mirror Maintenance Conference, Mt. Palomar Observatory, April: R. Gredel
- Infrarot-Kolloquium, Freiburg, April: R. Hofferbert (eingeladener Vortrag)
- First DIVA Thinkshop, MPIA, Heidelberg, April: K.-H. Marien
- ESO Workshop on „The Origin of Stars and Planets“, Garching, April: A. Stolte (Poster)
- EBL Workshop, Helsinki, Finnland, April: D. Lemke
- Black Holes at the Centers of Galaxies from $z > 4$, AIP, Potsdam, April: H.-W. Rix (eingeladener Vortrag)
- Spectral classification in large, deep surveys using neural networks, Astronomisches Institut der Universität Basel, Mai: C. A. L. Bailer-Jones (eingeladener Vortrag)
- Modelling data: Analogies in neural networks, simulated annealing and genetic algorithms, Konferenz „Model-based reasoning“, Pavia, Italien, Mai: C. A. L. Bailer-Jones
- Omega 2000: a new wide field near infrared camera for Calar Alto und „Time-resolved photometric monitoring of brown dwarfs“, Calar Alto Kolloquium, Heidelberg: Mai: C. A. L. Bailer-Jones
- Calar Alto Kolloquium, Heidelberg, Mai: E. K. Grebel (Vortrag)
- GAIA -Konferenz The termination of stellar parameters with GAIA, ESTEC/ESA, Niederlande: Juni: C. A. L. Bailer-Jones (eingeladener Vortrag)
- Dunkle Materie, Jahresversammlung der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin, Juni: A. Burkert (eingeladener Vortrag)
- XVIIth IAP Colloquium on „Gaseous Matter in Galaxies and Intergalactic Space“, Paris, Frankreich, Juni: E. K. Grebel (eingeladener Übersichtsvortrag)
- IAU Kolloquium „184 AGN Surveys“, Armenien, Juni: M. Haas (eingeladener Vortrag)
- „Where's The Matter? Tracing Dark and Bright Matter With The New Generation of Large-Scale Surveys, Juni: S. Khochfar
- Teilchenastrophysik-Workshop, Potsdam, Juni: D. Lemke (eingeladener Vortrag)
- Infrared and Submillimeter Space Astronomy-Colloquium, Frankreich, Juni: M. Stickel (eingeladener Vortrag)
- „Determination of stellar parameters with GAIA bei der Konferenz“ Census of the Galaxy: Challenges for photometry and spectrometry with GAIA, Wilna, Litauen, Juli: C. A. L. Bailer-Jones
- Workshop über „The Lowest-Mass Galaxies and Constraints on Dark Matter“, Schloss Ringberg, Juli/August: E. K. Grebel (Vorträge)
- Konferenz „Tracing Cosmic Evolution with Galaxy Clusters“, Sesto, Südtirol, Italien, Juli: L. Pentericci
- „Galaxy Structure Research at the MPIA“, MPIA Hauskolloquium, Heidelberg, Juli: H.-W. Rix
- „Galactic Nuclei: Is smaller more interesting?“, Symposium „The Lowest Mass Galaxies“, Schloss Ringberg, Juli: H.-W. Rix
- „Tracing Cosmic Evolution with Galaxy Clusters“, Sesto, Südtirol, Italien: Juli: H.-J. Röser
- „Cosmological Galaxy Formation and Dark Matter Halos“, Workshop, Santa Cruz, CA, USA, August: A. Burkert (eingeladener Vortrag)
- MPA/ESO/MPE/USM Joint Astronomy Conference: „Lighthouses of the Universe“, Garching, August: S. Jester (Vortrag)
- Konferenz „Lighthouses of the Universe: The Most Luminous Celestial Objects and their use for Cosmology“, Garching, August: L. Pentericci
- Deutsche Schule und Rotary Club, Marbella, Spanien, September: K. Birkle (öffentlicher Vortrag)
- „First UKAFF Conference“, Leicester, UK, September: A. Burkert (eingeladener Vortrag)
- Kolloquium, Observatoire de Strasbourg, Strasbourg, Frankreich, September: E. K. Grebel
- OPTICON Medium-sized Telescopes, Toulouse, Frankreich, September: R. Gredel

- OPTICON Board Meeting, München, September: R. Gredel
- 9th ESMATS, Belgien, September: R. Hofferbert (eingeladener Vortrag)
- Workshop on Relativistic Jets, Schloss Ringberg, September: S. Jester
- Kolloquium, Astronomy & Astrophysics Department, University of Chicago, September: S. Jester
- Astronomisches Kolloquium, University of Minnesota, September: S. Jester (eingeladener Vortrag)
- Science Lunch Talk, MIT Center for Space Research, Cambridge, USA, September: S. Jester
- 9th ESMATS, Belgien, September: O. Krause
- JENAM, München, September: C. Maier (Poster)
- Herbsttagung der Astronomischen Gesellschaft, München, September: R. Mundt (Poster)
- Herbsttagung der Astronomischen Gesellschaft, München, September: A. Stolte (Poster)
- Workshop „Elliptical Galaxies“, Schloss Ringberg, November: A. Burkert (eingeladener Vortrag)
- Physikalisches Kolloquium und Seminarvortrag, Universität Bochum, Bochum, November: E. K. Grebel
- Workshop „Formation & Evolution of Giant Elliptical Galaxies“, Ringberg, November: U. Klaas (eingeladener Vortrag)
- „Disks of Galaxies: Kinematics, Dynamics and Perturbations“, Puebla, Mexico, November: T. Kranz (Vortrag)
- Hochschultag, TFH Berlin, November: D. Lemke (Festvortrag)
- XIII Canary Islands Winter School of Astrophysics: „Cosmochemistry“, Puerto de la Cruz, Teneriffa, November: C. Maier (Poster)
- DFG-Workshop zur Sternentstehung, Bad Honnef, November: R. Mundt
- International Conference „Disks of Galaxies: Kinematics, Dynamics and Perturbations“, Puebla, Mexiko, November: H.-W. Rix (Vortrag)
- „Gas vs. Stars, Jeans vs. Schwarzschild: The Pain and Gain of Detailed Dynamical Modeling“, Workshop, Schloss Ringberg, November: H.-W. Rix (Vortrag)
- Kolloquium, Steward Observatory, University of Arizona, Tucson, Dezember: E. K. Grebel
- ESO, Garching, Dezember: U. Klaas (eingeladener Vortrag)

Mitarbeit in Gremien

- C. A. L. Bailer-Jones: Mitglied des GAIA Science Team der ESA; Vorsitzender der GAIA „Classification“ Arbeitsgruppe; Mitglied der DIVA- Arbeitsgruppe für Photometrie und Spektroskopie; Mitglied des Scientific Organizing Committee der Konferenz „Census of the Galaxy: Challenges for photometry and spectrometry with GAIA“.
- E. K. Grebel: Gutachterin für Anträge im kanadischen Programmkomitee für die Gemini-Teleskope, Mitglied des Studentenauswahlkomitees am MPIA, Mitglied des PhD Advisory Council (PAC) am MPIA, Vertreterin des MPIA im Collaboration Council des Sloan Digital Sky Survey, Gleichstellungsbeauftragte, stellvertretendes Vorstandsmitglied der Wissenschaftlichen Ernst-Patzer-Stiftung.
- R. Gredel: Mitglied des Calar Alto Programmausschusses; Mitglied der OPTICON-Arbeitsgruppe „Future of medium-sized telescopes“.
- U. Klaas: Mitglied des ISO Post Operations Coordination Committee, Co-Investigator HERSCHEL-PACS-Konsortium.
- K.-H. Marien: Mitglied des DIVA Co-Investigator-Teams
- R. Mundt: Mitglied des Calar Alto Programmausschusses
- D. Lemke: Mitglied im ISO Science Team der ESA; Co-Investigator HERSCHEL-PACS-Konsortium; Co-Investigator NGST-MIRI; Mitglied Gutachter-Ausschuss Verbundforschung Astronomie, MPIA-Koordinator POE-Netzwerk.
- R.-R. Rohloff, Mitglied des Sloan Digital Sky Survey (SDSS) Review Committee, November, Fermilab, Chicago, USA.
- H.-J. Röser, Sekretär des Programmkomitees Calar Alto, Vergabe der MPG-Beobachtungszeit am 2.2-m-Teleskop auf La Silla.

Veröffentlichungen

- Abrahám, P., C. Kiss, L. V. Tóth, A. Moór, F. Sato, S. Nikoli and J. G. A. Wouterloot: Low mass clouds in the Cepheus-Cassiopeia void. I. Khavtassi 15. *Astronomy and Astrophysics* 363, 755-766 (2001)
- Azzaro, M., C. M. Gutiérrez and F. Prada: Morphological Analysis of Satellite Galaxies in External Systems. In: *Galaxy Disks and Disk Galaxies*, Rome/Italy 2000, (Eds.) J. G. Funes, E. M. Corsini. ASP Conference Series 230, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 431-432
- Bailer-Jones, C. A. L.: Automated stellar classification for large surveys: a review of methods and results. In: *Automated Data Analysis in Astronomy*, Puna/India 2000, (Eds.) R. Gupta, H.P. Singh, C. A. L. Bailer-Jones. Narosa Publishing House, New Delhi 2001, 83-98
- Bailer-Jones, C. A. L.: Surface Features, Rotation and Atmospheric Variability of Ultra Cool Dwarfs. In: *Ultra-cool Dwarfs: New Spectral Types L and T*, Manchester 2000, (Eds.) H.R.A. Jones, I.A. Steele. Springer, Heidelberg 2001, 271-288
- Bailer-Jones, C. A. L., R. Gupta and H. P. Singh: An introduction to artificial neural networks. In: *Automated Data Analysis in Astronomy*, Puna/India 2000, (Eds.) R. Gupta, H.P. Singh, C. A. L. Bailer-Jones. Narosa Publishing House, New Delhi 2001, 51-68
- Bailer-Jones, C. A. L. and R. Mundt: Erratum: Variability in ultra cool dwarfs: Evidence for the evolution of surface features. *Astronomy and Astrophysics* 374, 1071 (2001)
- Bailer-Jones, C. A. L. and R. Mundt: Variability in ultra cool dwarfs: Evidence for the evolution of surface features. *Astronomy and Astrophysics* 367, 218-235 (2001)
- Bailer-Jones, C. A. L., R. Mundt and D. Barrado y Navascués: A Deep Medium Band Survey for Brown Dwarfs in IC 2391. In: *Cool Stars, Stellar Systems and the Sun – 11th Cambridge Workshop*, Puerto de la Cruz/Tenerife 1999, (Eds.) Garcia Lopez, R. J., R. Rebolo, M. R. Zapatero Osorio. ASP Conference Series 223, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, CD-1508
- Bailer-Jones, D. M. and C. A. L. Bailer-Jones: Modelling data: Analogies in neural networks, simulated annealing and genetic algorithms. In: *Model-based Reasoning*, Pavia/ Italy 2001, (Ed.) L. Magnani. Kluwer/Plenum, Dordrecht 2001, 85-102
- Barrado y Navascués, D., J. R. Stauffer, J. Bouvier and E. Martin: From the Top to the Bottom of the Main Sequence: A Complete Mass Function of the Young Open Cluster. *The Astrophysical Journal* 546, 1006-1018 (2001)
- Barrado y Navascués, D., J. R. Stauffer, C. Briceno, B. Patten, N. C. Hambly and J. D. Adams: Very low-mass stars and brown dwarfs of the young open cluster IC 2391. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 134, 103-114 (2001)
- Barrado y Navascués, D., M. R. Zapatero Osorio, V. J. S. Béjar, R. Rebolo, E. L. Martín, R. Mundt and C. A. L. Bailer-Jones: Optical spectroscopy of isolated planetary mass objects in the σ Orionis cluster. *Astronomy and Astrophysics* 377, L9-L13 (2001)
- Barth, A. J., L. C. Ho, A. V. Filippenko, H.-W. Rix and W. L. W. Sargent: The Broad-Line and Narrow-Line Regions of the LINER NGC 4579. *The Astrophysical Journal* 546, 205-209 (2001)
- Barth, A. J., M. Sarzi, H.-W. Rix, L. C. Ho, A. V. Filippenko and W. L. W. Sargent: Evidence for a Supermassive Black Hole in the S0 Galaxy NGC 3245. *The Astrophysical Journal* 555, 685-708 (2001)
- Béjar, V. J. S., E. L. Martín, M. R. Zapatero Osorio, R. Rebolo, D. Barrado y Navascués, C. A. L. Bailer-Jones, R. Mundt, I. Baraffe, C. Chabrier and F. Allard: The Substellar Mass Function in σ Orionis. *The Astrophysical Journal* 556, 830-836 (2001)
- Béjar, V. J. S., M. R. Zapatero Osorio, R. Rebolo, D. Barrado y Navascués, C. A. L. Bailer-Jones and R. Mundt: A Deep IZ(J) Search for the Brown Dwarf Population in σ Orionis. In: *Cool Stars, Stellar Systems and the Sun – 11th Cambridge Workshop*, Puerto de la Cruz/Tenerife 1999, (Eds.) Garcia Lopez, R.J., R. Rebolo, M.R. Zapatero Osorio. ASP Conference Series 223, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, CD-1519

- Berkefeld, T., A. Glindemann and S. Hippler: Multi-Conjugate Adaptive Optics with Two Deformable Mirrors: Requirements and Performance. *Experimental Astronomy* 11, 1-21 (2001)
- Bodenheimer, P. and A. Burkert: Formation of Wide Binaries by Fragmentation. In: *Birth and Evolution of Binary Stars (Posters)*, Potsdam 2000, (Eds.) B., H. Reipurth, Zinnecker. International Astronomical Union, Astrophysikalisches Institut Potsdam, Potsdam 2001. IAU Symposium 200, D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht 2001, 13
- Boehnhardt, H., G. Tozzi, K. Birkle, O. Hainaut, T. Sekiguchi, M. Vair, J. Watanabe and G. Rupprecht: Visible and near-IR observations of transneptunian objects. Results from ESO and Calar Alto Telescopes. *Astronomy and Astrophysics* 378, 653-667 (2001)
- Böker, T., R. P. van der Marel, L. Mazzuca, H.-W. Rix, G. Rudnick, L. C. Ho and J. C. Shields: A Young Stellar Cluster in the Nucleus of NGC 4449. *The Astronomical Journal* 121, 1473-1481 (2001)
- Bonaccini, D., W. Hackenberg, M. Cullum, E. Brunetto, M. Quattri, E. Allaert, M. Dimmler, M. Tarenghi, A. van Kersteren, C. di Chirico, M. Sarazin, B. Buzzoni, P. Gray, R. Tamai, M. Tapia, R. Davies, S. Rabien, T. Ott and S. Hippler: ESO VLT Laser Guide Star Facility. *The Messenger* 105, 9 (2001)
- Brandner, W., E. K. Grebel, R. H. Barbá, N. R. Walborn and A. Moneti: HUBBLE Space Telescope NICMOS Detection of a Partially Embedded, Intermediate-Mass, Pre-Main-Sequence Population in the 30 Doradus Nebula. *The Astronomical Journal* 122, 858-865 (2001)
- Burkert, A.: The Formation of the Milky Way in the Cosmological Context. In: *Cosmic Evolution*, Paris 2000, (Eds.) E. Vangioni-Flam, R. Ferlet, M. Lemoine. World Scientific, New Jersey/USA 2001, 245
- Burkert, A.: Self-Interacting Cold Dark Matter Halos. In: *Dark Matter in Astro- and Particle Physics*, Heidelberg 2000, (Ed.) H.V. Klapdor-Kleingrothaus, Springer, Heidelberg 2001, 89
- Burkert, A. and P. Bodenheimer: Turbulence and Cloud Angular Momentum. In: *The Formation of Binary Stars*, Potsdam/Germany 2000, (Eds.) H. Zinnecker, R.D. Mathieu. IAU Symposium 200, International Astronomical Union, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 122-131
- Burkert, A. and T. Naab: Evidence for Large Stellar Disks in Elliptical Galaxies. In: *Starburst Galaxies: Near and Far*, Ringberg Castle/Germany 2000, (Eds.) L. Tacconi, D. Lutz. Springer, Heidelberg 2001, 147
- Burkert, A. and J. Silk: Star Formation-Regulated Growth of Black Holes in Protogalactic Spheroids. *The Astrophysical Journal* 554, L151-L154 (2001)
- Busso, M., R. Gallino, D. L. Lambert, C. Travaglio and V. V. Smith: Nucleosynthesis and Mixing on the Asymptotic Giant Branch. III. Predicted and Observed s-Process Abundances. *The Astrophysical Journal* 557, 802-821 (2001)
- Butler, D. J., R. Davies and M. Feldt: ALFA Crowded Field Observations: Experiences, Data Reduction, and Future Strategies. In: *Adaptive Optical Systems Technology*, Munich/Germany 2000, (Ed.) P. Wizinowich. SPIE Conference Series 4007, SPIE, Bellingham, WA. 2001, 857-863
- Cenarro, A. J., N. Cardiel, J. Gorgas, R. F. Peletier, A. Vazdekis and F. Prada: Empirical calibration of the near-infrared CaII triplet. I. The stellar library and index definition. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 326, 959-980 (2001)
- Cenarro, A. J., J. Gorgas, N. Cardiel, S. Pedraz, R. F. Peletier and A. Vazdekis: Empirical calibration of the near-infrared CA II triplet. II. The stellar atmospheric parameters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 326, 981-994 (2001)
- Cenarro, A. J., J. Gorgas, N. Cardiel, A. Vazdekis, R. F. Peletier, S. Pedraz and F. Prada: The Near-IR CA II Triplet: Empirical Calibration and Stellar Populations Synthesis Models. In: *Highlights of Spanish Astrophysics II*, Santiago de Compostela/Spain 2000, (Eds.) J. Zamorano, J. Gorgas, J. Gallego. 4th Meeting of Spanish Astronomical Society, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2001, 137-140
- Cretton, N., T. Naab, H.-W. Rix and A. Burkert: The Kinematics of 3:1 Merger Remnants and the Formation of Low-Luminosity Elliptical Galaxies. *The Astrophysical Journal* 554, 291-297 (2001)
- Cretton, N., T. Naab, H.-W. Rix and A. Burkert: The Kinematics of 3:1-Merger Remnants and the Formation of Low-Luminosity Elliptical Galaxies. In: *Galaxy Disks and Disk Galaxies*, Rome 2000, (Eds.) G. José, J.G. Funes, E.M. Corsini. ASP Conference Series 230, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 261-262
- Davies, R. I., M. Tecza, L. W. Looney, F. Eisenhauer, L. E. Tacconi-Garman, N. Thatte, T. Ott, S. Rabien, S. Hippler and M. Kasper: Adaptive Optics Integral Field Spectroscopy of the Young Stellar Objects in LkH α 225. *The Astrophysical Journal* 552, 692-698 (2001)

- Dehnen, W.: Towards optimal softening in three-dimensional N-body codes – I. Minimizing the force error. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 324, 273-291 (2001)
- Dole, H., R. Gispert, G. Lagache, J.-L. Puget, F. R. Bouchet, C. Cesarsky, P. Ciliegi, D. L. Clements, M. Dennefeld, F.-X. Désert, D. Elbaz, A. Franceschini, B. Guiderdoni, M. Harwit, D. Lemke, A. F. M. Moorwood, S. Oliver, W. T. Reach, M. Rowan-Robinson and M. Stickel: FIRBACK III: Catalogue, source counts and cosmological implications of the 170 μm ISO deep survey. *Astronomy and Astrophysics* 372, 364-376 (2001)
- Dolphin, A. E., L. Makarova, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, D. Geisler, E. K. Grebel, P. Guhathakurta, P. W. Hodge, A. Sarajedini and P. Seitzer: The stellar content and distance of UGC 4483. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 324, 249-256 (2001)
- Dye, S., A. N. Taylor, E. M. Thommes, K. Meisenheimer, C. Wolf and J. A. Peacock: Gravitational lens magnification by Abell 1689: distortion of the background galaxy luminosity function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 321, 685-698 (2001)
- Fan, X., V. K. Narayanan, R. H. Lupton, M. A. Strauss, G. R. Knapp, R. H. Becker, R. L. White, L. Pentericci, S. K. Leggett, Z. a. n. Haiman, J. E. Gunn, Z. Ivezic, D. P. Schneider, S. F. Anderson, J. Brinkmann, N. A. Bahcall, A. J. Connolly, I. a. n. Csabai, M. Doi, M. Fukugita, T. Geballe, E. K. Grebel, D. Harbeck, G. Hennessey, D. Q. Lamb et al.: A Survey of $z \sim 5.8$ Quasars in the Sloan Digital Sky Survey. I. Discovery of Three New Quasars and the Spatial Density of Luminous Quasars at $z \sim 6$. *The Astronomical Journal* 122, 2833-2849 (2001)
- Fried, J. W., B. von Kuhlmann, K. Meisenheimer, H.-W. Rix, C. Wolf, H. H. Hippelein, M. Kümmel, S. Phleps, H. J. Röser, I. Thiering and C. Maier: The luminosity function of field galaxies and its evolution since $z = 1$. *Astronomy and Astrophysics* 367, 788 - 800 (2001)
- Fried, J. W. and B. M. F. von Kuhlmann: The Evolution of the Luminosity Function of Field Galaxies from $z = 1$ to $z = 0$. In: *The Evolution of Galaxies I. Observational Clues*, Granada/Spain 2000, (Eds.) J.M. Vilchez, G. Stasinska, E. Pérez. *Astrophysics and Space Science Supplement* 277, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2001, 581
- Gallego, J., A. Delgado, J. Zamorano and M. Stickel: Far-Infrared properties of local star-forming galaxies from the UCM sample. In: *The Promise of the Herschel Space Observatory*, Toledo/Spain 2000, (Eds.) G.L. Pilbratt, J. Cernicharo, A.M. Heras et al. *ESA Special Publications SP-460*, ESA, Noordwijk 2001, 401
- Geyer, M. P. and A. Burkert: The Effect of Gas Loss on the Formation of Bound Stellar Clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 323, 988-994 (2001)
- Geyer, M. P. and A. Burkert: Gas Expulsion from Star Forming Regions and the Formation of Globular Clusters. In: *Galaxy Disks and Disk Galaxies*, Rome 2000, (Eds.) J.G. Funes, E.M. Corsini. *ASP Conference Series* 230, *Astronomical Society of the Pacific*, San Francisco 2001, 311-312
- Grebel, E. K.: Dwarf Galaxies in the Local Group in the Local Volume. In: *Dwarf Galaxies and Their Environment*, Bad Honnef/Germany 2001, (Eds.) K.S. de Boer, R.-J. Dettmar, U. Klein. *Shaker Verlag*, Aachen 2001, 45-52
- Grebel, E. K.: A Map of the Northern Sky: The Sloan Digital Sky Survey in Its First Year. In: *Dynamic Stability and Instabilities in the Universe*, Bremen, Germany 2000, (Ed.) R. Schielicke. *Reviews in Modern Astronomy* 14, *Astronomische Gesellschaft*, Hamburg 2001, 223-243
- Grebel, E. K.: Star Formation Histories of Nearby Dwarf Galaxies. *Astrophysics and Space Science* 277, 231-239 (2001)
- Grebel, E. K.: Stellar Populations in Local Group Dwarf Galaxies and Beyond. In: *Science with the Large Binocular Telescope*, Ringberg Castle/Germany 2000, (Ed.) T. Herbst. *Max-Planck Society and LBT Beteiligungsgesellschaft*, Heidelberg 2001, p. 79-85
- Gredel, R.: The Calar Alto Observatory – present and future instrumentation. *New Astronomy Review* 45, 33-36 (2001)
- Gredel, R., J. H. Black and M. Yan: Interstellar C_2 and CN toward the Cyg OB2 association. A case study of X-ray induced chemistry. *Astronomy and Astrophysics* 375, 553-565 (2001)

- Grün, E., M. S. Hanner, S. B. Peschke, T. Müller, H. Boehnhardt, T. Y. Brooke, H. Campins, J. Crovisier, C. Delahodde, I. Heinrichsen, H. U. Keller, R. F. Knacke, H. Krüger, P. Lamy, C. Leinert, D. Lemke, C. M. Lisse, M. Müller, D. J. Osip, M. Solc, M. Stickel, M. Sykes, V. Vanysek and J. Zarnecki: Broadband infrared photometry of comet Hale-Bopp with ISOPHOT. *Astronomy and Astrophysics* 377, 1098-1118 (2001)
- Guenther, E. W., V. Joergens, R. Neuhäuser, G. Torres, N. Stout Batalha, J. Vijapurkar, M. Fernández and R. Mundt: A Spectroscopic and Photometric Survey for Pre-Main Sequence Binaries. In: *The Formation of Binary Stars*, Potsdam/Germany 2000, (Eds.) H. Zinnecker, R.D. Mathieu. IAU Symposium 200, International Astronomical Union, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 165-168
- Guenther, E. W., R. Neuhäuser, V. Joergens, M. Fernández, N. S. Batalha, R. Mundt, C. Leinert, J. Vijapurkar and G. Torres: A Search for Pre-main Sequence Spectroscopic Binaries. In: *Cool Stars, Stellar Systems and the Sun – 11th Cambridge Workshop*, Puerto de la Cruz/Tenerife 2000, (Eds.) R.J. Garcia Lopez, R. Rebolo, M.R. Zapatero Osorio. ASP Conference Series 223, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, CD-515
- Guenther, E. W., G. Torres, N. Stout Batalha, V. Joergens, R. Neuhäuser, J. Vijapurkar, M. Fernández and R. Mundt: RXJ1603.8-3938 – A Surprising Pre-Main Sequence Spectroscopic Binary. *Astronomy and Astrophysics* 366, 965-971 (2001)
- Gupta, R., H.P. Singh, C. A. L. Bailer-Jones (Eds.): *Automated Data Analysis in Astronomy*, IUCAA, Puna/India, 2000. Narosa Publishing House, New Delhi 2001, 364 pp
- Haas, M.: Dust in PG Quasars As Seen By ISO. *New Astronomy Reviews* 45, 617-624 (2001)
- Haas, M., U. Klaas, K. Meisenheimer, D. Lemke, S. A. H. Müller and R. Chini: The infrared spectra of quasars as seen by ISO. In: *The Promise of the Herschel Space Observatory*, Toledo/Spain 2000, (Eds.) G.L. Pilbratt, J. Cernicharo, A.M. Heras et al. ESA Special Publication Series SP-460, ESA, Noordwijk 2001, 139-142
- Haas, M., U. Klaas, S. A. H. Müller, R. Chini and I. Coulson: The PAH 7.7 μm /850 μm ratio as new diagnostics for high extinction in ULIRGs – increasing evidence for a hidden quasar in Arp 220. *Astronomy and Astrophysics* 367, L9-L13 (2001)
- Harbeck, D., E. K. Grebel, J. Holtzman, P. Guhathakurta, W. Brandner, D. Geisler, A. Sarajedini, A. Dolphin, D. Hurley-Keller and M. Mateo: Population Gradients in Local Group Dwarf Spheroidal Galaxies. *The Astronomical Journal* 122, 3092-3105 (2001).
- Heitsch, F., M.-M. MacLow and R. S. Klessen: Gravitational Collapse in Turbulent Molecular Clouds. II. Magnetohydrodynamical Turbulence. *The Astrophysical Journal* 547, 280-291 (2001)
- Henning, T., M. Feldt, B. Stecklum and R. Klein: High-resolution imaging of ultracompact HII regions. III. G11.11-0.40 and G341.21-0.21. *Astronomy and Astrophysics* 370, 100-111 (2001)
- Herbst, T. M., P. Bizenberger, M. Ollivier, H.-W. Rix and R.-R. Rohloff: Fizeau Interferometry on the Large Binocular Telescope. In: *Science with the Large Binocular Telescope*, Ringberg Castle/Germany 2000, (Ed.) T. Herbst. Max-Planck Society and LBT Beteiligungsgesellschaft, Heidelberg 2001, 193-201
- Herbst, W., C. A. L. Bailer-Jones and R. Mundt: The Mass Dependence of Stellar Rotation in the Orion Nebula Cluster. *The Astrophysical Journal* 554, L197-L200 (2001)
- Hinz, J. L., H.-W. Rix and G. M. Bernstein: A comparison of coma cluster S0 galaxies with the Tully-Fisher Relation for late-type spirals. *The Astronomical Journal* 121, 683 - 691 (2001)
- Hirashita, H., A. Burkert and T. T. Takeuchi: Chemical Evolution of the Galaxy Based on the Oscillatory Star Formation History. *The Astrophysical Journal* 552, 591-600 (2001)
- Hofferbert, R., D. Lemke, O. Krause, U. Grözinger, A. Böhm, W. Bollinger and J. Katzer: A cold focal plane chopper for HERSCHEL-PACS – critical components and reliability. In: *9th ESMATS (European Space Mechanism and Tribology Symposium)*, Liège/Belgium 2001, (Ed.) R.A. Harris. ESA Special Publication Series SP-480, ESA, Noordwijk 2001, 221-229.
- Hotzel, S., J. Harju, D. Lemke, K. Mattila and C. M. Walmsley: Dense gas and very cold dust in the dark core B217. *Astronomy and Astrophysics* 372, 302-316 (2001)
- Huang, J.-S., D. Thompson, M. W. Kümmel, K. Meisenheimer, C. Wolf, S. V. W. Beckwith, R. Fockenbrock, J. W. Fried, H. Hippelein, B. von Kuhlmann, S. Phleps, H.-J. Röser and E. Thommes: The Calar Alto Deep Imaging Survey: K-band Galaxy number counts. *Astronomy and Astrophysics* 368, 787-796 (2001)

- Ibata, R., G. Lewis, M. Irwin, E. Totten and T. Quinn: Great circle tidal streams: evidence for a nearly spherical massive dark halo around the Milky Way. *The Astrophysical Journal* 551, 294-311 (2001)
- Jensen, B. L., J. U. Fynbo, J. Gorosabel, J. Hjorth, S. Holland, P. Möller, B. Thomsen, G. Björnsson, H. Pedersen, I. Burud, A. Henden, N. R. Tanvir, C. J. Davis, P. Vreeswijk, E. Rol, K. Hurley, T. Cline, J. Trombka, T. McClanahan, R. Starr, J. Goldsten, A. J. Castro-Tirado, J. Greiner, C. A. L. Bailer-Jones, M. Kümmel et al.: The afterglow of the short/intermediate-duration gamma-ray burst GRB 000301C: A jet at $z = 2.04$. *Astronomy and Astrophysics* 370, 909-922 (2001)
- Jester, S., H.-J. Röser, K. Meisenheimer, R. Perley and R. Conway: HST optical spectral index map of the jet of 3C 273. *Astronomy and Astrophysics* 373, 447-458 (2001)
- Juvela, M., K. Mattila, K. Lehtinen, D. Lemke, R. Laureijs and T. Prusti: Far infrared and molecular line observations of Lynds L183 – studies of cold gas and dust. *Astronomy and Astrophysics* 383, 502-518 (2001)
- Juvela, M., K. Mattila and D. Lemke: Far Infrared Extragalactic Background Radiation: Source Counts with ISOPHOT. In: *The extragalactic infrared background and its cosmological implications*, Manchester 2000, (Eds.) M. Harwit, M.G. Hauser. IAU Symposium 204, International Astronomical Union, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 261
- Kaltcheva, N., R. Gredel and C. Fabricius: The association surrounding NGC 2439. *Astronomy and Astrophysics* 372, 95-104 (2001)
- Kaltcheva, N., R. Gredel and C. Fabricius: NGC 2439 ubv photometry. *VizieR Online Data Catalog* 337, 20095 (2001)
- Karachentsev, I. D., M. E. Sharina, A. E. Dolphin, D. Geisler, E. K. Grebel, P. Guhathakurta, P. W. Hodge, V. E. Karachentseva, A. Sarajedini and P. Seitzer: A new galaxy near the Local Group in Draco. *Astronomy and Astrophysics* 379, 407-411 (2001)
- Karachentsev, I. D., M. E. Sharina, A. E. Dolphin, D. Geisler, E. K. Grebel, P. Guhathakurta, P. W. Hodge, V. E. Karachentseva, A. Sarajedini and P. Seitzer: WFPC2 observations of two dwarf spheroidal galaxies in the M 81 group. *Astronomy and Astrophysics* 375, 359-365 (2001)
- Kasper, M., M. Feldt and T. M. Herbst: Spatially resolved imaging spectroscopy of T Tauri. *The Astrophysical Journal* 567, 262-272 (2001)
- Keller, S. C., E. K. Grebel, G. J. Miller and K. M. Yoss: $UBVI$ and H Photometry of the h and χ Persei Cluster. *The Astronomical Journal* 122, 248-256 (2001)
- Khanzadyan, T., M. Smith, R. Gredel, T. Stanke and C. J. Davis: Active Star Formation in the Large Bok Globule CB 34*. *Astronomy and Astrophysics* 383, 502-518 (2001)
- Khochfar, S. and A. Burkert: Redshift Evolution of the Merger Fraction of Galaxies in Cold Dark Matter Cosmologies. *The Astrophysical Journal* 561, 517-520 (2001)
- Kiss, C., P. Ábrahám, U. Klaas, M. Juvela and D. Lemke: Sky confusion noise in the Far-Infrared: Cirrus, Galaxies and the Cosmic Far-Infrared Background. *Astronomy and Astrophysics* 379, 1161-1169 (2001)
- Klaas, U., M. Haas, S. A. H. Müller, R. Chini, B. Schulz, J. Coulson, H. Hippelein, K. Wilke, M. Albrecht and D. Lemke: Infrared to millimetre photometry of ultra-luminous IR galaxies: new evidence favouring a 3-stage dust model. *Astronomy and Astrophysics* 379, 823-844 (2001)
- Klessen, R. S. and A. Burkert: The Formation of Stellar Clusters: Gaussian Cloud Conditions. II. *Astrophysical Journal* 549, 386-401 (2001)
- Klessen, R. S. and A. Burkert: Fragmentation of Molecular Clouds: The Initial Phase of a Stellar Cluster. In: *New Horizons of Computational Science*, Tokyo/Japan 2001, (Eds.) T. Ebisuzaki, J. Makino. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2001, 239
- Kley, W., G. D'Angelo and T. Henning: Three-Dimensional Simulations of a Planet Embedded in a Protoplanetary Disk. *The Astrophysical Journal* 547, 457-464 (2001)
- Koch Miramond, L., P. Podsiadlowski, M. Haas, T. Naylor and M. Sauvage: Determination of Mass Limits around Pulsars at 10 and 90 micron with ISO-0.3 cm. In: *Black Holes in Binaries and Galactic Nuclei*, Garching 1999, (Eds.) L. Kaper, E. P. J. van den Heuvel, P.A. Woudt. ESO Astrophysics Symposia, Springer, Berlin 2001, 139

- Kochanek, C. S., E. E. Falco, C. D. Impey, J. Lehar, B. A. McLeod, H.-W. Rix, C. R. Keeton, J. A. Muñoz and C. Y. Peng: The Evolution of Gravitational Lens Galaxies. In: *Gravitational Lensing: Recent Progress and Future Goals*, Boston, MA. 1999, (Eds.) T.G. Brainerd, C. S. Kochanek. ASP Conference Series 237, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 159-168
- Koresko, C. D. and C. Leinert: The Infrared Companions of T Tauri Stars: Clues to the Formation and Early Evolution of Binaries. In: *The formation of Binary Stars*, Potsdam 2000, (Eds.) H. Zinnecker, R.D. Mathieu. ASP Conference Series 200, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 265 - 274
- Kranz, T., A. Slyz and H. W. Rix: Measuring Stellar and Dark Mass Fractions in Spiral Galaxies. In: *Dark Matter in Astro- and Particle Physics*, Heidelberg 2000, (Ed.) H.V. Klapdor-Kleingrothaus. Springer, Heidelberg 2001, 33-37
- Kranz, T., A. Slyz and H.-W. Rix: Probing for Dark Matter within Spiral Galaxy Disks. *The Astrophysical Journal* 562, 164-178 (2001)
- Kranz, T., A. Slyz and H.-W. Rix: The Submaximal Disk of NGC 4254. In: *Galaxy Disks and Disk Galaxies*, Rome 2000, (Eds.) J.G. Funes, E.M. Corsini. ASP Conference Series 230, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 261-262
- Krause, O.: *Stellare CCD-Photometrie: Vom Halbleiter zum Alter des Universums*. Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg 2001, 21 pp.
- Krause, O., U. Grözinger, D. Lemke, A. Böhm and R. Hofferbert: Magnetoresistive position sensors for cryogenic space applications. In: *9th ESMATS (European Space Mechanism and Tribology Symposium)*, Liège/Belgium 2001, (Ed.) R.A. Harris. ESA Special Publication Series SP-480, ESA, Noordwijk 2001, 335-338
- Kroupa, P. and A. Burkert: On the Origin of the Distribution of Binary Star Periods. *The Astrophysical Journal* 555, 945-949 (2001)
- Kümmel, M., K. Meisenheimer, J.-S. Huang, D. Thompson, C. Wolf, J. Fried, H. Hippelein, B. von Kuhlmann, S. Phleps and H. J. Röser: The CADIS Picture Evolution in Range. *Astrophysics and Space Science Supplement* 277, 599 (2001)
- Kümmel, M., K. Meisenheimer, H. J. Röser, C. Wolf, J. Fried, H. Hippelein, C. Maier, B. von Kuhlmann and S. Phleps: The Data Flow in the Calar Alto Deep Imaging Survey. In: *Mining the Sky*, Garching/Germany 2000, (Eds.) A.J. Banday, S. Zaroubi, M. Bartelmann. ESO Astrophysics Symposia, Springer, Berlin 2001, 564-570
- Kurk, J. D., L. Pentericci, H. J. A. Röttgering and G. K. Miley: A proto-cluster around a radio galaxy at redshift 2.16. *Astrophysics and Space Science Supplement* 277, 543-546 (2001)
- Lai, S.-P., Y.-H. Chu, C.-H. R. Chen, R. Ciardullo and E. K. Grebel: A Critical Examination of Hypernova Remnant Candidates in M 101. I. MF 83. *The Astrophysical Journal* 547, 754-764 (2001)
- Lehtinen, K., L. K. Haikala, K. Mattila and D. Lemke: A far-infrared view of low mass star formation in the Cederblad 110 nebula of Chamaeleon I. *Astronomy and Astrophysics* 367, 311-332 (2001)
- Leinert, C., T. L. Beck, S. Ligor, M. Simon, J. Woitas and R. R. Howell: The near-infrared and ice-band variability of Haro 6-10. *Astronomy and Astrophysics* 369, 215-221 (2001)
- Leinert, C., M. Haas, P. Abraham and A. Richichi: Halos around Herbig Ae/Be stars – more common than for the less massive T Tauri stars. *Astronomy and Astrophysics* 375, 927-936 (2001)
- Leinert, C., H. Jahreiß, J. Woitas, S. Zucker, T. Mazeh, A. Eckart and R. Köhler: Dynamical mass determination for the very low mass stars LHS 1070 B and C. *Astronomy and Astrophysics* 367, 183-188 (2001)
- Lemke, D., P. Abraham, M. Haas, P. Héraudeau, S. Hotzel, C. Kiss, U. Klaas, O. Krause, C. Leinert, K. Meisenheimer, M. Stickel and L. V. Tóth: ISOPHOT surveys and the extragalactic background. In: *The extragalactic infrared background and its cosmological implications*, Manchester 2000, (Eds.) M. Harwit, M.G. Hauser. IAU Symposium 204, The Astronomical Union, The Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 247-259
- Mandel, H., I. Appenzeller, D. Bomans, F. Eisenhauer, B. Grimm, T. M. Herbst, R. Hofman, M. Lehmitz, R. Lemke, M. Lehnert, R. Lenzen, T. Luks, R. Mohr, W. Seifert, A. Seltmann, N. Thatte, P. Weiser and W. Xu: LU-CIFER - A NIR Spectrograph and Imager for the LBT. In: *Science with the Large Binocular Telescope*, Ringberg Castle/Germany 2000, (Ed.) T. Herbst, Max-Planck Society and LBT Beteiligungsgesellschaft, Heidelberg 2001, 177-186

- Márquez, I., J. Masegosa, T. Morel, A. Efstathiou, A. Verma, P. Väisänen, D. Alexander, P. Héraudeau, C. Surace, I. Pérez-Fournón, F. Cabrera-Guerra, J. I. González-Serrano, E. A. González-Solares, S. Serjeant, S. Oliver, M. Rowan-Robinson and E. Consortium: Mid-FIR properties of ELAIS sources. In: *The Promise of the Herschel Space Observatory*, Toledo/Spain 2000, (Eds.) G.L. Pilbratt, J. Cernicharo, A.M. Heras et al. ESA Special Publication Series SP-460, ESA, Noordwijk 2001, 147
- Meisenheimer, K., M. Haas, S. A. H. Müller, R. Chini, U. Klaas and D. Lemke: Dust emission from 3C radio galaxies and quasars: New ISO observations favour the unified scheme. *Astronomy and Astrophysics* 372, 719-729 (2001)
- Meisenheimer, K., C. Maier, H. Hippelein, H.-J. Röser, J. Fried, M. W. Kümmel, B. von Kuhlmann, S. Phleps, H.-W. Rix and C. Wolf: The CADIS Search for Lyman-Alpha Galaxies. In: *Deep Fields*, Garching/Germany, 2000, (Eds.) S. Christani, A. Renzini, R.E. Williams. Springer, Berlin 2001. ESO Astrophysics Symposia, 102
- Muñoz, J. A., E. E. Falco, C. S. Kochanek, J. Lehar, B. A. McLeod, B. R. McNamara, A. A. Vihkinen, C. D. Impey, H.-W. Rix, C. R. Keeton, C. Y. Peng and C. R. Mullis: Multifrequency Analysis of the New Wide-Spread Gravitational Lens Candidate RXJ 0921+4529. *The Astrophysical Journal* 546, 769 - 774 (2001)
- Muñoz, J. A., E. E. Falco, C. S. Kochanek, B. A. McLeod, J. Lehar, C. D. Impey, C. R. Keeton, C. Y. Peng and H.-W. Rix: Host Galaxies: A New Approach to Distinguish Lensed and Binary Quasars. In: *Highlights of Spanish Astrophysics II*, Santiago de Compostela/Spain 2000, (Eds.) J. Zamorano, J. Gorgas, J. Gallego. 4th Meeting of Spanish Astronomical Society, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2001, 57-60
- Naab, T. and A. Burkert: The Formation of Disks in Elliptical Galaxies. *The Astrophysical Journal* 555, L91-L94 (2001)
- Naab, T. and A. Burkert: Gas Dynamics and Disk Formation in 3:1 Mergers. In: *Galaxy Disks and Disk Galaxies*, Rome/Italy 2000, (Eds.) G. José, S.J. Funes, E.M. Corsini. ASP Conference Series 230, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 451-452
- Naab, T. and A. Burkert: Formation of Ellipticals by Unequal Mass Mergers. In: *Galaxy Disks and Disk Galaxies*, Rome/Italy 2000, (Eds.) G. José, S.J. Funes, E. M. Corsini. ASP Conference Series 230, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 453-454
- Naab, T. and A. Burkert: Gas Dynamics and Inflow in Gas-Rich Galaxy Mergers. In: *The Central Kiloparsec of Starbursts and AGN: The La Palma Connection*, Los Cancejos, La Palma/Spain 2001, (Eds.) J.H. Knapen, J.E. Beckman, I. Shlosman et al. ASP Conference Series 249, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 735-738
- Nikoli, S., C. Kiss, J. G. A. Wouterloot, L. Johanson and L. V. Tóth: L1274: a multiwavelength study of a dark cloud in the Cep-Cas void. *Astronomy and Astrophysics* 367, 694-704 (2001)
- Odenkirchen, M., E. K. Grebel, D. Harbeck, W. Dehnen, H.-W. Rix, H. J. Newberg, B. Yanny, J. Holtzman, J. Brinkmann, B. Chen, I. Csabai, J. J. E. Hayes, G. Hennessy, R. B. Hindsley, Z. Ivezić, E. K. Kinney, S. J. Kleinman, D. Long, R. H. Lupton, E. H. Neilsen, A. Nitta, S. A. Snedden and D. G. York: New Insights on the Draco Dwarf Spheroidal Galaxy from the Sloan Digital Sky Survey: A Larger Radius and No Tidal Tails. *The Astronomical Journal* 122, 2538-2553 (2001)
- Odenkirchen, M., E. K. Grebel, C. M. Rockosi, W. Dehnen, R. Ibata, H.-W. Rix, A. Stolte, C. Wolf, J. E. Anderson Jr., N. A. Bahcall, J. Brinkmann, I. Csabai, G. Hennessy, R. B. Hindsley, Z. Ivezić, R. H. Lupton, J. A. Munn, J. R. Pier, C. Stoughton and D. G. York: Detection of Massive Tidal Tails around the Globular Cluster Palomar 5 with Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. *The Astrophysical Journal* 548 L165 - L169 (2001)
- Odenkirchen, M., V. V. Makarov, C. Soubiran and S. Urban: The tidal extension of the Coma star cluster revealed by HIPPARCOS, Tycho-2 and spectroscopic data. In: *Dynamics of Star Clusters and the Milky Way*, Heidelberg/Germany 2000, (Eds.) S. Deiters, B. Fuchs, A. Just et al. ASP Conference Series 228, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 535.
- Ofek, E., D. Maoz, T. Kolatt and H.-W. Rix: A survey for large separation-lensed FIRST quasars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 324, 463 - 472 (2001)

- Patsis, P. A., P. Héraudeau and P. Grosboel: Spiral arms in near-infrared bands. Broad- and narrow-band NIR photometry. *Astronomy and Astrophysics* 370, 875-880 (2001)
- Pentericci, L., P. McCarthy, H. Röttgering, G. Miley, W. van Breugel and R. Fosbury: NICMOS Observations of High-Redshift Radio Galaxies: Witnessing the Formation of Bright Elliptical Galaxies? *The Astrophysical Journal Supplement Series* 135, 63-85 (2001)
- Phleps, S., K. Meisenheimer, B. Fuchs and C. Wolf: CADIS deep star counts: Galactic structure and the stellar luminosity function. *Astronomy and Astrophysics* 356, 108-117 (2001)
- Pizzella, A., E. M. Corsini, J. C. Vega Beltrán, J. E. Beckman, J. G. Funes, W. W. Zeilinger, M. Sarzi and F. Bertola: Kinematics of Gas and Stars in 20 Disk Galaxies. In: *Galaxy Disks and Disk Galaxies*, Rome/Italy 2000, (Eds.) J.G. Funes, E.M. Corsini. ASP Conference Series 230, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 279-280
- Popescu, C. C., R. Tuffs, H. Völk, D. Pierini and B. F. Madore: Cold Dust in Late-Type Virgo Cluster Galaxies. *The Astrophysical Journal* 567, 221-236 (2001)
- Rifatto, A., P. Rafanelli, S. Ciroi, M. Radovich, J. Vennik, G. Richter and K. Birkle: The Active Merging System ESO 202-G23 (Carafe Nebula). *The Astrophysical Journal* 122, 2301-2317 (2001)
- Rix, H.-W., E. Falco, C. Impey, C. Kochanek, J. Lehar, B. A. McLeod, J. Muñoz and C. Y. Peng: Host Galaxies of Lensed Luminous Quasars at $z \sim 2$. In: *Gravitational Lensing: Recent Progress and Future Goals*, Boston, MA. 1999, (Eds.) T.G., Brainerd, C.S. Kochanek. ASP Conference Series 237, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 169-175
- Rousselot, P., C. Arpigny, H. Rauer, R. Gredel, J. Manfroid and A. Fitzsimmons: A fluorescence model of the C3 radical in comets. *Astronomy and Astrophysics* 368, 689-699 (2001)
- Rudnick, G., M. Franx, H.-W. Rix, A. Moorwood, K. Kuijken, L. van Starckenburk, P. van der Werf, H. Röttgering, P. van Dokkum and I. Labbé: A K-Band-Selected Photometric Redshift Catalog in the Hubble Deep Field South: Sampling the Rest-Frame V Band to $z = 3$. *The Astronomical Journal* 122, 2205-2221 (2001)
- Rudnick, G., H.-W. Rix and M. Franx: FIRES at the VLT: Measuring the Rest-Frame V-Band Luminosity of Galaxies from $z \sim 3$ to Now. In: *Galaxy Disks and Disk Galaxies*, Rome/Italy 2000, (Eds.) J.G. Funes, E.M. Corsini. ASP Conference Series 230, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 261-262
- Rusin, D., C. S. Kochanek, M. Norbury, E. E. Falco, C. D. Impey, J. Lehar, B. A. McLeod, H.-W. Rix, C. R. Keeton, J. A. Muñoz and C. Y. Peng: B1359-154: A Six Image Lens Produced by a $z = 1$ Compact Group of Galaxies. *The Astrophysical Journal* 557, 594-604 (2001)
- Sarzi, M., F. Bertola, M. Cappellari, E. M. Corsini, J. G. Funes, A. Pizzella and J. C. Vega Beltrán: The Orthogonal Bulge-Disk Decoupling in NGC 4698. *Astrophysics and Space Science* 276, 467-473 (2001)
- Sarzi, M., H.-W. Rix, J. C. Shields, G. Rudnick, L. C. Ho, D. McIntosh, A. V. Filippenko and W. L. W. Sargent: Supermassive Black Holes in Bulges. *The Astrophysical Journal* 550, 65 - 74 (2001)
- Sarzi, M., H.-W. Rix, J. C. Shields, G. Rudnick, D. H. McIntosh, L. C. Ho, A. V. Filippenko and W. L. W. Sargent: Supermassive Black Holes from the Survey of Nearby Nuclei with STIS. In: *Galaxy Disks and Disk Galaxies*, Rome/Italy 2000, (Eds.) J.G. Funes, E.M. Corsini. ASP Conference Series 230, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 261-262
- Schuller, P. and C. Leinert: Performance of Optical Path Length Modulators in MIDI. In: *Summer School on Space and Ground Based Optical and InfraRed Interferometry*, Leiden 2000, (Eds.) I.J. Percheron, I. Montilla, L. D'Arcio. NEVEC Leiden Observatory, Leiden 2001, 371.
- Singh, H. P., C. A. L. Bailer-Jones and R. Gupta: Principal component analysis and its application to stellar spectra. In: *Automated Data Analysis in Astronomy*, Pune/India 2000, (Eds.) R. Gupta, H.P. Singh, C. A. L. Bailer-Jones. Narosa Publishing House, New Delhi 2001, 69-82
- Slyz, A., J. E. G. Devriendt, A. Burkert, K. Prendergast and J. Silk: Star formation in Viscous Galaxy Disks. In: *Galaxy Disks and Disk Galaxies*, Rome/Italy 2000, (Eds.) J.G. Funes, E.M. Corsini. ASP Conference Series 230, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 333-334

- Stickel, M., U. Klaas, D. Lemke and K. Mattila: Far-Infrared Emission from Dust in Abell Clusters. In: Deep Fields, Garching/Germany 2000, (Eds.) S. Cristiani, A. Renzini, R.E. Williams. ESO Astrophysics Symposia, Springer, Berlin 2001, 216
- Stickel, M., D. Lemke, U. Klaas, C. A. Beichman, M. Rowan-Robinson, A. Efstathiou, S. Bogun, M. F. Kessler and G. Richter: The ISOPHOT 170 Micron Serendipity Sky Survey: A Plea to FIRST. In: The Promise of FIRST, Toledo/Spain 2000, (Eds.) G.L. Pilbratt, J. Cernicharo, A.M. Heras et al. ESA Special Publication Series SP-460, ESA, Noordwijk 2001, 109
- Taylor, A. N., S. Dye, E. Thommes, C. Wolf and K. Meisenheimer: Gravitational Lens Magnification and the Distortion of the Galaxy Luminosity Function. In: Gravitational Lensing: Recent Progress and Future Goals, Boston 1999, (Eds.) T.G. Brainerd, C. Kochanek. ASP Conference Series 237, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 295
- Torres, S., E. García-Berro, A. Burkert and J. Isern: The Impact of a Merger Episode in the Galactic Disc White Dwarf Population. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 328, 492-500 (2001)
- Tovmassian, G. H., G. Stasínska, V. H. Chavushyan, S. V. Zharikov, C. Gutierrez and F. Prada: SBS 1150+599A: An extremely oxygen-poor planetary nebula in the Galactic halo? *Astronomy and Astrophysics* 370, 456-467 (2001)
- Travaglio, C., A. Burkert and D. Galli: Inhomogeneous chemical evolution of the Galactic halo. *Astrophysics and Space Science Supplement* 277, 211-211 (2001)
- Travaglio, C., D. Galli and A. Burkert: Inhomogeneous Chemical Evolution of the Galactic Halo: Abundance of r-Process Elements. *The Astrophysical Journal* 547, 217-230 (2001)
- Travaglio, C., R. Gallino, M. Busso and A. Dalmazzo: Galactic enrichment of heavy s-elements: from Ba to Bi. *Memorie della Società Astronomica Italiana* 72, 381-390 (2001)
- Travaglio, C., R. Gallino, M. Busso and R. Gratton: Lead: Asymptotic Giant Branch Production and Galactic Chemical Evolution. *The Astrophysical Journal* 549, 346-352 (2001)
- Travaglio, C., S. Randich, D. Galli, J. Latanzio, L. M. Elliott, M. Forestini and F. Ferrini: Galactic chemical evolution of Lithium: Interplay between stellar sources. *The Astrophysical Journal* 559, 909-924 (2001)
- Van den Bosch, F. C., A. Burkert and R. A. Swaters: The angular momentum content of dwarf galaxies: new challenges for the theory of galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 326, 1205-1215 (2001)
- Witas, J., R. Koehler and C. Leinert: T Tauri binary systems orbital motion. *VizieR Online Data Catalog*, originally published in *Astronomy and Astrophysics* 336, 90249 (2001)
- Witas, J., R. Köhler and C. Leinert: Orbital motion in T Tauri binary systems. *Astronomy and Astrophysics* 369, 249-262 (2001)
- Witas, J., C. Leinert and R. Koehler: Near-IR observations of young binaries. *VizieR Online Data Catalog* 337, 60982 (2001), originally published in *Astronomy and Astrophysics*
- Witas, J., C. Leinert and R. Köhler: Mass ratios of the components in T Tauri binary systems and implications for multiple star formation. *Astronomy and Astrophysics* 376, 982-996 (2001)
- Wolf, C., K. Meisenheimer, S. Dye, M. Kleinheinrich, H.-W. Rix and L. Wisotzki: Deep BVR-band photometry of the Chandra Deep Field South from the COMBO-17 survey. *Astronomy and Astrophysics* 377, 442-449 (2001)
- Wolf, C., K. Meisenheimer and H.-J. Röser: Classification and Redshift Estimation in Multi-Color Surveys. In: *Mining The Sky*, Garching/Germany 2000, (Eds.) A.J. Banday, S. Zaroubi, M. Bartelmann. ESO Astrophysics Symposia, Springer, Berlin 2001, 337-343
- Wolf, C., K. Meisenheimer and H.-J. Röser: Efficiency of Medium-Band Surveys. In: *The New Era of Wide Field Astronomy*, Preston/UK 2000, (Eds.) R., A. Clowes, Adamson, G. Bromage. ASP Conference Series 232, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 320
- Wolf, C., K. Meisenheimer and H.-J. Röser: Object Classification in Astronomical Multi-color Surveys. *Astronomy and Astrophysics* 365, 660-680 (2001)
- Wolf, C., K. Meisenheimer, H. J. Röser, S. W. V. Beckwith, F. H. Chaffee, J. Fried, H. H. Hippelein, J.-S. Huang, M. Kümmel, B. von Kuhlmann, C. Maier, S. Phleps, H.-W. Rix, E. Thommes and D. Thompson: Multi-color classification in the Calar Alto deep imaging survey. *Astronomy and Astrophysics* 365, 681-698 (2001)

Zapatero Osorio, M. R., V. J. S. Béjar, E. L. Martín, R. Rebolo, D. Barrado y Navascués, C. A. L. Bailer-Jones and R. Mundt: Discovery of a Very Young Planetary-Mass Population in σ Orionis: the Substellar Mass Function. In: *From Darkness to Light: Origin and Evolution of Young Stellar Clusters*, Cargèse, Corsica/France 2000, (Eds.) T. Montmerle, P. André. ASP Conference Series 243, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 477-486

Zapatero Osorio, M. R., V. J. S. Béjar, E. L. Martín, R. Rebolo, D. Barrado Y Navascués, C. A. L. Bailer-Jones and R. Mundt: Evidence for Free-floating Planetary-mass Objects in the σ Orionis Star Cluster. In: *Cool Stars, Stellar Systems and the Sun – 11th Cambridge Workshop, Tenerife/Spain 2000*, (Eds.) R.J. Garcia Lopez, R. Rebolo, M.R. Zapatero Osorio. ASP Conference Series 223, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2001, 70

Diplomarbeiten

Walcher, J.: Detecting Tidal Tails With Field Cameras. Diploma thesis Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg 2001

Ziegler, M.: Velocity and Density Structure of Molecular Cloud Cores. Diploma Thesis Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg 2001

Doktorarbeiten

Heitsch, F.: Turbulence and Fragmentation in Molecular Clouds. PhD Thesis Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg 2001

Hetznecker, H.: Die Entstehungsgeschichte der dichten Kerne von CDM-Halos. PhD Thesis Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg 2001

Hotzel, S.: The 170 μ m Zufallsdurchmusterung mit ISO. Strukturen im kalten Staub der Milchstraße. PhD Thesis Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg 2001

Jester, S.: High-resolution multi-wavelength study of the jet in 3C 273. PhD Thesis Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg 2001

Phleps, S.: The Evolution of the Large Scale Structure of the Universe since $z = 1$. PhD Thesis Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg 2001

Habilitationsschrift

Haas, M.: Quasars in the Infrared. Habilitationsschrift Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg 2001



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 78 Instituten und Einrichtungen erkenntnisorientierte und anwendungs offene Grundlagenforschung. Bei einem Jahresetat von rund 1.25 Milliarden € im Jahr 2001 beschäftigt sie rund 11 600 Mitarbeiter, von denen etwa ein Viertel Wissenschaftler sind. Zusätzlich forschen im Jahresverlauf rund 7000 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.

Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften
Referat für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Hofgartenstr. 8
80539 München

Tel.: 089/2108-1275 oder -1277
Fax: 089/2108-1207
Internet: <http://www.mpg.de>



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT