



Max-Planck-Institut für Astronomie

Heidelberg-Königstuhl

Jahresbericht

2000



Zum Titelbild:

Die Kuppeln des Observatoriums auf dem Calar Alto. Von links nach rechts: das 2.2-Meter-Teleskop, das 1.23-Meter-Teleskop, das 3.5-Meter Teleskop und das Schmidt-Teleskop.

Max-Planck-Institut für Astronomie

Heidelberg-Königstuhl

Jahresbericht

2000



Max-Planck-Institut für Astronomie

Geschäftsführender Direktor:

Prof. Immo Appenzeller (bis 31. Juli 2000)

Prof. Hans-Walter Rix (ab 1. August 2000)

Wissenschaftliche Mitglieder, Kollegium, Direktoren:

Prof. Immo Appenzeller (kommissarisch, bis 31. Juli 2000)

Prof. Steven Beckwith (beurlaubt)

Prof. Hans-Walter Rix

Emeritierte wissenschaftliche Mitglieder:

Prof. Hans Elsässer, Prof. Guido Münch

Auswärtige Wissenschaftliche Mitglieder:

Prof. Immo Appenzeller, Heidelberg

Prof. K.-H. Böhm, Seattle

Prof. G. H. Herbig, Honolulu

Prof. R. Rebolo, Teneriffa

Fachbeirat:

Prof. R. Bender, München; Prof. R.-J. Dettmar, Bochum; Prof. G. Hasinger, Potsdam; Prof. P. Léna, Meudon;

Prof. M. Moles Villamate, Madrid; Prof. F. Pacini, Florenz; Prof. K.-H. Schmidt, Potsdam; Prof. P. A. Strittmatter,

Tucson; Prof. S. D. M White, Garching; Prof. L. Woltjer, St. Michel l'Observatoire

Im Berichtsjahr waren insgesamt 187 Mitarbeiter (einschließlich Drittmittelbeschäftigten) am Institut, darunter 35 Wissenschaftler. Dazu kamen 39 Nachwuchs- und Gastwissenschaftler. Studenten der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg führen am Institut Diplom- und Doktorarbeiten aus. In den Werkstätten des Instituts werden Lehrlinge ausgebildet.

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

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

E-mail: Name@mpia-hd.mpg.de

Anonymous ftp: ftp.mpia-hd.mpg.de

Internet: <http://www.mpia-hd.mpg.de>

Isophot Datacenter: phthelp@mpia-hd.mpg.de

Calar-Alto-Observatorium

Anschrift: Centro Astronómico Hispano Alemán

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

Telefon: 0034-50-230988, -632500, Fax: 0034-50-632504

E-mail: Name@caha.es

Impressum

© 2001 Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg

Alle Rechte vorbehalten. Printed in Germany.

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

Text: Dr. Thomas Bürke

Bilder: MPIA und andere

Graphik und Bildbearbeitung: Dipl.-Phys. Axel M. Quetz, Grafiklabor

Layout: Josef Hegele

Druck: Laub GmbH + Co., Elztal-Dallau

ISSN 1437-2924 – Internet: ISSN 1617-0490

Inhalt

I Allgemeines	5	IV Wissenschaftliche Arbeiten	45
I.1 Forschungsziele des MPIA	5	IV.1. Galaktische Astronomie.....	45
Das Observatorium des MPIA	5	Rotation junger Sterne.....	45
Internationale Zusammenarbeit		Zirkumstellare Scheibe bewirkt Drehimpulsverlust .	48
in der bodengebundenen Astronomie	6	Umlaufperioden und Massen junger Doppelsterne	49
Extraterrestrische Forschung.....	8	ISOPHOT beobachtet Sternentstehung	
Lehre und Öffentlichkeitsarbeit	10	in Dunkelwolken	51
		Sternentstehung im Chamäleon-Komplex	51
I.2 Wissenschaftliche Fragestellungen.....	11	Der Chamäleon-Komplex	
Galaktische Forschung	11	in der ISO-Zufallsdurchmusterung	54
Extragalaktische Forschung	11	Isolierte Sternentstehung in Barnard 217	55
		Palomar 5 – ein Kugelsternhaufen in der Auflösung	57
II Highlights	13	Turbulenz bei der Sternentstehung	61
II.1 Planetenähnliche Objekte im freien Flug	13	Simulationen mit Turbulenz und Schwerkraft	61
Häufigkeit Brauner Zwerge		Rotation turbulenter Wolken.....	64
und »frei fliegender Planeten«	13	Planetenentstehung in Doppelsternen	65
Warum gibt es »frei fliegende Planeten«?	15	Computersimulation eines realen Vorbilds	66
		IV.2. Extragalaktische Astronomie.....	69
II.2 Die drei Phasen der Staubheizung		Spiralgalaxien mit optischer Schiefelage	69
in ultraleuchtkräftigen Infrarotgalaxien	17	Die extragalaktische Hintergrundstrahlung	
Drei Phasen: heißer, warmer und kalter Staub.....	20	im fernen Infrarot	71
Aromatische Kohlenwasserstoffe	22	Die extragalaktische Hintergrundstrahlung	72
Ein versteckter Quasar in Arp 220?	23	Die ISOPHOT-Beobachtungsprojekte.....	72
Die Antennengalaxie – eine entstehende ULIRG	23	Die hierarchische Entwicklung des Universums	73
		ISO belegt Vereinheitlichung von Radiogalaxien	
II.3 Schwarze Löcher in Galaxienzentren	26	und radiolauten Quasaren.....	76
Schwarze Löcher in vier schwach		Das Vereinheitlichte Modell	76
aktiven Spiralgalaxien.....	26	Infrarotbeobachtungen mit ISOPHOT	77
Das Schwarze Loch in der S0-Galaxie NGC 3245.....	29	Entwicklungseffekte	79
		Personal	81
III Instrumentelle Entwicklungen	31	Arbeitsgruppen	
ALFA – Adaptive Optik für den Calar Alto	31	und wissenschaftliche Zusammenarbeit	82
ALFA – Astronomische Leistungsfähigkeit	32	Zusammenarbeit mit Firmen	84
ALFA – mit Laserleitstern	34	Lehrveranstaltungen	86
LAICA – die Weitfeldkamera für den Calar Alto	35	Teilnahme an Tagungen, wissenschaftliche	
OMEGA 2000 – Weitfeld-Infrarotkamera		und öffentliche Vorträge	86
für den Calar Alto	36	Mitarbeit in Gremien	88
CONICA – Hochauflösende Infrarotkamera		Veröffentlichungen	89
für das VLT	36		
MIDI – Infrarotinterferometer für das VLT	38		
PACS – Infrarotkamera für HERSCHEL (ehemals FIRST)	39		
LUCIFER und LINC – zwei Instrumente für das LBT	40		
ISOPHOT – Streulichtmessung bei Sonnenfinsternis	42		

I Allgemeines

I.1 Forschungsziele des MPIA

Das Observatorium des MPIA

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 heranzuführen. 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, Südpatrien. 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**.

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

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. Von der Hamburger Sternwarte wurde der 80-Zentimeter-Schmidt-Spiegel übernommen. Zusätzlich steht ein spanisches 1.5-Meter-Teleskop auf dem Gelände, es untersteht dem Observatorio Nacional de Madrid und gehört nicht zum DSAZ. 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 allen Astronomen in der Max-Planck-Gesellschaft zur Verfügung.

Heute betreibt das MPIA zum einen das Calar-Alto-Observatorium. Dazu gehört die ständige Optimierung der dortigen Teleskope. Mit dem Calar-Alto-Observatorium verfügt das MPIA über eines der beiden leistungsstärksten Observatorien in Europa. Zum anderen sind auch Beteiligungen an internationalen Observatorien und Pro-





Abb. I.2: Die Teleskopkuppeln auf dem Calar Alto. V.l.n.r.: das spanische 1.5-m-Teleskop, der Hamburger Schmidt-Spiegel, das 1.23-m-Teleskop, das 2.2-m-Teleskop und das 3.5-m-Teleskop.

jekten der wissenschaftlichen Raumfahrt von wesentlicher Bedeutung. Der Bau neuer Instrumente, die an den bodengebundenen oder im Weltraum operierenden Teleskopen zum Einsatz kommen, stellt einen wesentlichen Teil der Arbeit am MPIA dar (Kap. III). Dazu ist das MPIA mit modernsten Feinwerk- und Elektronikwerkstätten ausgestattet. In Heidelberg werden die an den Teleskopen gewonnenen Daten ausgewertet. Die Forschung konzentriert sich auf den »klassischen« sichtbaren und auf den infraroten Spektralbereich.

Internationale Zusammenarbeit in der bodengebundenen Astronomie

Derzeit entsteht unter der Federführung des MPIA für das noch im Aufbau befindliche größte Observatorium der Erde, das Very Large Telescope (VLT) der Eso auf dem Cerro Paranal in Chile, die hoch auflösende Infrarot-

kamera CONICA. Und mit dem Bau von MIDI, einem interferometrischen Instrument für das VLT (Abb. I.3) wurde begonnen. Mit diesem zukunftsweisenden Gerät soll es ab dem Jahre 2002 erstmals möglich sein, zwei Großteleskope im Infraroten interferometrisch zu koppeln.

Darüber hinaus ist das MPIA am **Large Binocular Telescope (LBT, Abb. I.4)** maßgeblich beteiligt. Das LBT ist eine Art Doppelfernrohr, in dem zwei Spiegel mit einem Durchmesser von je 8.4 Metern auf einer gemeinsamen Montierung angebracht sind. Beide Spiegel zusammen verfügen über eine Lichtsammelkraft, die einem einzelnen 11.8-Meter-Spiegel gleich kommt. Damit wird das LBT nach der im Jahre 2004 vorgesehenen Inbetriebnahme das weltweit leistungsstärkste Einzelteleskop sein. Zudem ist geplant, das Doppelfernrohr für interferometrische Beobachtungen einzusetzen. Dann entspricht sein räumliches Auflösungsvermögen dem eines Einzelspiegels mit 22.8 Metern Durchmesser. Das LBT wird derzeit von einem amerikanisch-italienisch-deutschen Konsortium auf dem Mount Graham in Arizona, USA gebaut.

Das MPIA wird 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 in Potsdam sowie der Landessternwarte Heidelberg zu

voraussichtlich 25 % an den Kosten und der Nutzung des LBT beteiligt sein. Das MPIA hat als geschäftsführendes Institut der LBTB in vielfacher Weise zur endgültigen Definition des Instrumentariums beigetragen. Im Berichtsjahr hat das Institut zudem den Vorsitz im Scientific Advisory Board des LBT übernommen.

Die deutschen Partner bauen unter der Leitung der Heidelberger Landesternwarte für das LBT den Nahinfrarot-Spektrographen 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.

Gleichzeitig laufen die Planungen für das LBT-Interferometer, das mit adaptiver Optik ausgestattet sein wird, auf Hochtouren. Am MPIA wird hierfür die Optik der Strahlzusammenführung LINC (Beam Combiner) entwor-

fen. Letztlich soll damit Interferometrie im Wellenlängenbereich von $0.6 \mu\text{m}$ bis $2.2 \mu\text{m}$ möglich sein. Dies erfordert ein äußerst anspruchsvolles optisches Design, mit dessen Konzeption im Berichtsjahr begonnen wurde. Dazu wurde ein informelles Konsortium mit Kollegen von der Universität Köln und dem Osservatorio Astrofisico di Arcetri (Florenz) gebildet.

Seit mehreren Jahren arbeitet an einem der größten Teleskope der Nordhalbkugel, dem britischen 3.9-Meter-Teleskop **United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT)** auf Hawaii, die am MPIA gebaute IR-Kamera MAX (Mid-Infrared Array eXpandable). Die Astronomen des MPIA haben einen festen Anteil der Beobachtungszeit an diesem Teleskop. Mit UKIRT sind hervorragende Beobachtungen im Infraroten möglich.

Das MPIA ist zudem am **Sloan Digital Sky Survey (SDSS)** beteiligt. Dies ist die bislang umfangreichste digitale 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

Abb. 1.3: Zwei der vier Großteleskope des Very Large Telescope sollen ab 2002 interferometrisch gekoppelt werden. Das Institut ist an diesem Projekt mit dem Bau des Instruments MIDI beteiligt.

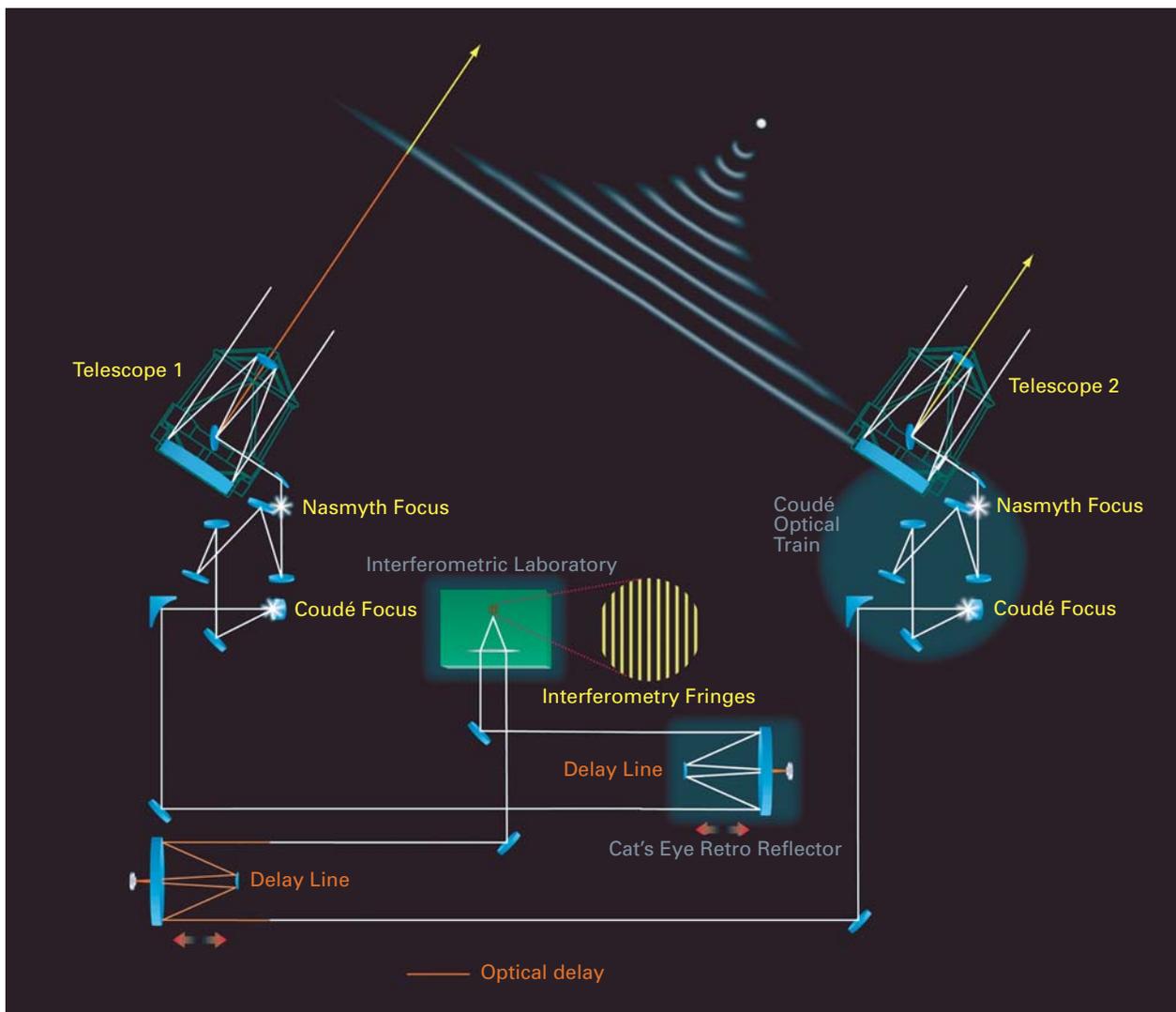




Abb. I.4: Das Large Binocular Telescope auf dem Mount Graham wird in wenigen Jahren zu den leistungsfähigsten Teleskopen der Erde gehören.

sowie die Rotverschiebungen von etwa einer Million Galaxien und Quasaren 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 Konsortium amerikanischer, japanischer und deutscher Institute durchgeführt. In Deutschland sind das Hei-

delberger MPIA und das Garching MPI für Astrophysik beteiligt. Für die Sach- und Geldbeiträge des MPIA zum SDSS erhalten einige Mitarbeiter des MPIA die vollen Datenrechte. Nach einer Testphase von etwas mehr als einem Jahr hat der Survey im April 2000 offiziell begonnen.

Extraterrestrische Forschung

Das MPIA engagiert sich seit seiner Gründung in der extraterrestrischen Forschung. Der damit verbundene frühzeitige Einstieg in die Infrarotastronomie 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** erfolgreich geflogen sind. Etwa parallel lief die Entwicklung des Infrarotteleskops **THISBE** (Telescope of Heidelberg for Infrared Studies by Balloon-borne Experiments). Es gelangte an einem Höhenforschungsballon bis in 40 Kilometer Höhe, wo Beobachtungen im mittleren und fernen Infrarot möglich sind.

Heute ist das MPIA wesentlich an dem Projekt **ISO** der Europäischen Weltraumbehörde ESA beteiligt: **ISOPHOT**, eines von vier Messinstrumenten auf Iso, entstand unter der Federführung des Instituts. Iso lieferte über zwei Jahre lang erstklassige Daten und wurde am 8. April 1998 abgeschaltet, nachdem sein Kühlmittelvorrat erschöpft war. Zahlreiche Arbeiten aus allen Bereichen der Astronomie sind bereits erschienen, welche die Leistungsfähigkeit dieses Weltraumteleskops dokumentieren.

Im Sommer 1998 hat die drei Jahre dauernde Postoperationsphase begonnen. In dieser Zeit werden die Daten sorgfältig kalibriert und archiviert. Einem nach objektiven Kriterien übersichtlich geordneten Archiv kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Diese Aufgabe wurde gelöst, indem die ESA in ihrer Station in Villafranca (Spanien) 1998 ein Zentralarchiv einrichtete und daneben die Institute, unter deren Leitung die Instrumente entstanden, oder die sonst an ISO beteiligt sind, ihrerseits je ein Datenzentrum aufbauten.

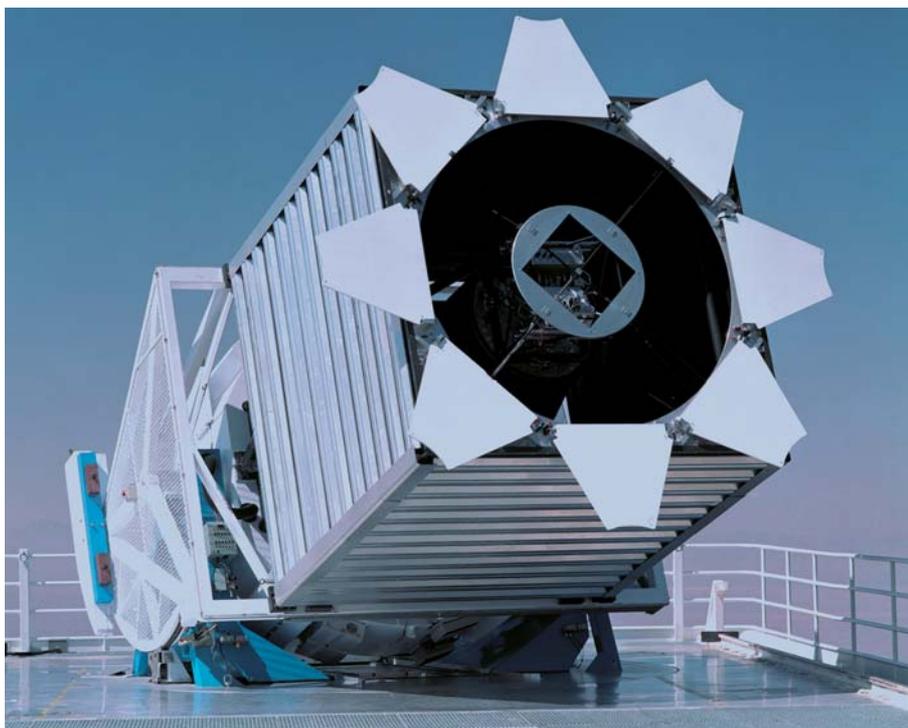
Abb. 1.5: Das 2.5-Meter-Teleskop des Sloan Digital Sky Survey. (Bild: SDSS)

Gemäß einer Vereinbarung mit der ESA ist das **ISOPHOT**-Datenzentrum am MPIA ein Knoten in diesem internationalen Netz von acht ISO-Datenzentren (s. Jahresbericht 1998, S. 6). In Zusammenarbeit mit dem ISO Science Operations Center, Madrid, wurde am MPIA die Standard-Software »PHT Interactive Analysis« (PIA) zur Auswertung der vom Satelliten gelieferten Rohdaten entwickelt. Neben der reinen Archivierung und Rekalibrierung der Beobachtungsdaten fungiert das Heidelberger Datenzentrum vor allem auch als Service-Einrichtung für Astronomen. Im Berichtsjahr wurden etwa 30 Besucher betreut.

Auf wissenschaftlicher Seite gab es eine ganze Reihe sehr erfolgreicher Arbeiten. Hierzu zählen die Beobachtung der Hintergrundstrahlung von jungen Galaxien und die Bestätigung des Vereinheitlichten Modells für Quasare und Radiogalaxien (beides Kap. IV.2), sowie die umfangreiche Studie der ultraleuchtkräftigen Infrarotgalaxien (Kap. II).

Die mit **ISOPHOT** gesammelten Erfahrungen waren Ausschlag gebend dafür, dass das MPIA an dem Bau der **Infrarotkamera 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.

Das Institut beteiligt sich an einem von der Johns Hopkins University in Baltimore vorgeschlagenen Satellitenexperiment der NASA. Das **PRIME** (Primordial Explorer) genannte Teleskop soll im Bereich von $0.9 \mu\text{m}$ bis $3.4 \mu\text{m}$ Wellenlänge einen Großteil des Himmels bis zu einer scheinbaren Helligkeit von 24.5 mag kartieren. **PRIME**



wäre ein Vorläufer des geplanten HUBBLE-Nachfolgers NGST (New Generation Space Telescope). Es soll aus einem 75-cm-Teleskop bestehen, das die Erde auf einer polaren Bahn in 650 km Höhe umkreist. Die Fokalebene ist durch drei Spiegel in vier Wellenlängenkanäle aufgeteilt, die mit neu entwickelten Infrarot-Arrays bestückt werden.

In einzelnen, jeweils 150 Sekunden dauernden Belichtungen ließe sich mit PRIME innerhalb von drei Jahren ein Viertel des gesamten Himmels mit einer bis dahin unerreichten Empfindlichkeit abrastern. Damit könnte PRIME praktisch auf allen Gebieten der modernen Astronomie wesentlich neue Erkenntnisse bringen. So könnte das Teleskop beispielsweise 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 Parsec, extrasolare Planeten der Größe Jupiters in Entfernungen von bis zu 50 Parsec, Quasare bis $z = 25$ oder Protogalaxien bis $z = 20$ finden.

Im Rahmen der jetzt laufenden Phase A wurde im Jahr 2000 eine Industriestudie des Teleskops vorbereitet. Das MPIA soll die Beistellung des Teleskops übernehmen.

Lehre und Öffentlichkeitsarbeit

Zu den Aufgaben des Instituts gehören auch die Lehre und die Information einer breiten Öffentlichkeit über die Ergebnisse der astronomischen Forschung. So halten Mitarbeiter des Instituts Vorlesungen und Seminare an der Universität Heidelberg, sowie 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 die Arbeit am 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 Uralaxien 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 wichtiges Gebiet 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 jetzt erstmals im Innern großer Staubwolken sehr kalte und dichte Gebiete nachweisen. Es sind protostellare Kerne, die kurz vor dem Kollaps stehen oder sich bereits zu Sternen zusammenziehen (Kap. IV.1). Für großes Aufsehen sorgte die Beobachtung planetenähnlicher Körper, die nicht um einen fremden Stern kreisen (Kap. II). Die Objekte sind noch sehr jung und heiß, weswegen sie im Infraroten nachweisbar waren. Aufgrund ihrer geringen Masse würden zumindest einige von ihnen zur Gruppe der Planeten zählen. Bisher hatte man jedoch noch nie einen „frei fliegenden“ Planeten gesehen. Die Frage, auf welche Weise diese Körper entstanden sind, ist noch weitgehend ungelöst. Sie hat eine Debatte darüber ausgelöst, wie sich ein Planet überhaupt definieren lässt. Die Masse ist wohl nur eines von mehreren denkbaren Kriterien.

Auch die Theoriegruppe des Instituts hat sich im Berichtsjahr wieder mit unterschiedlichen Aspekten der Sternentstehung auseinandergesetzt. So gingen einige Forscher der Frage nach, auf welche Weise Turbulenz im Innern dichter Wolken aus Gas und Staub die Sternentstehung beeinflussen. Ein Ergebnis ist: Turbulente,

überschallschnelle Gasströmungen können zwar eine große Wolke als Ganzes daran hindern, zu kollabieren. Sie verhindern aber nicht, dass sich lokal Bereiche verdichten und dann immer weiter zusammenziehen, bis sich in ihnen Sterne bilden (Kap. IV.1).

Interessant ist auch der weitere Verlauf der Sternentwicklung. Gegen Ende der Kollapsphase bildet sich aufgrund der Rotation der Wolke um den Stern eine Scheibe aus Gas und Staub. Bei diesem Vorgang sammelt der Stern Materie aus der Scheibe auf und erhält immer mehr Drehimpuls: Er dreht sich also immer schneller. Irgendwann würden der Drehimpuls und damit die Fliehkräfte so groß werden, dass der Protostern nicht weiter kontrahieren kann. Die Objekte müssen also abgebremst werden, d.h. Drehimpuls verlieren. Dies geschieht in unterschiedlichen Entwicklungsphasen auf unterschiedliche Weise. Astronomen aus den USA und am MPIA haben von jungen Sternen die Rotationsgeschwindigkeiten gemessen und sind dabei auf einen Zusammenhang zwischen dem Stern und der ihn umgebenden Scheibe gestoßen. Sie konnten damit die Bedeutung der Scheibe für die Drehimpulsentwicklung von jungen Sternen weiter untermauern. Möglich wurden diese Beobachtungen vor allem durch die am Institut gebaute Weitfeldkamera.

Extragalaktische Forschung

Die extragalaktische Forschung beschäftigt sich mit den Galaxien und Galaxienhaufen. Hier ist es eine der größten Aufgaben, die Entwicklung der Galaxien nachzuvollziehen. Wie war die Sternentstehungsrate im frühen Universum? Sind Galaxien miteinander verschmolzen, so dass sich ihre Gesamtzahl im Laufe von Jahrtausenden verringert hat? Dies sind nur zwei der bedeutenden Fragen.

Wie bereits in den vergangenen Jahren, so konnte auch im Berichtsjahr das unter Leitung des MPIA gebaute ISOPHOT wertvolle neue Erkenntnisse für die extragalaktische Astronomie liefern. Von nahen Galaxien ist bekannt, dass bei intensiver Sternbildung große Staubmassen erwärmt werden, die dann im mittleren und fernen Infrarot leuchten. Da die Spektren von Galaxien aus dem frühen Universum rotverschoben sind, sollten diese Objekte vor allem im fernen Infrarot und bis in den Millimeterbereich beobachtbar sein. Das Observatorium ISO bot erstmals die Gelegenheit, diese extragalaktische Hintergrundstrahlung genauer zu untersuchen. Mehrere umfangreiche Projekte waren daher diesem Thema gewidmet. Sie tragen jetzt erste Früchte. Die Messdaten belegen eindeutig, dass die jungen Galaxien heftige Entwicklungsphasen durchlaufen haben, in denen geradezu explosionsartig neue Sterne entstanden sind (Kap. IV.2)

Ein weltweit aktueller Forschungsschwerpunkt betrifft die Frage nach supermassereichen Schwarzen Löchern in den Zentren von Galaxien. Die Entwicklung von Schwarzen Löchern scheint ein integraler Teil der Entwicklung der Galaxien zu sein. Dies trifft offenbar nicht nur auf Galaxien mit aktiven Kernen, sondern auch auf normale Galaxien wie unser Milchstraßensystem zu. Astronomen des MPIA gelang es gemeinsam mit Kollegen aus den USA, in fünf schwach aktiven Spiralgalaxien Schwarze Löcher mit einigen zehn bis hundert Millionen Sonnenmassen ausfindig zu machen (Kap. II.3). Diese neuen Messungen zeigen deutlicher als zuvor eine Beziehung zwischen der Masse eines Schwarzen Lochs und dem millionenfach größeren, umgebenden Sternsystem. Diese Korrelation muss eine Folge der Entwicklung der Galaxien sein. Ihre Ursache ist indes noch nicht geklärt.

Massereiche Schwarze Löcher sind die Ursache für die Kernaktivität zahlreicher Galaxien. Mittlerweile lassen

sich anhand ihrer Beobachtungsmerkmale etwa ein Dutzend verschiedene Typen aktiver Galaxien unterscheiden. Seit Ende der achtziger Jahre kommen jedoch immer mehr Astrophysiker zu der Überzeugung, dass diese Typen im Prinzip alle einheitlich aufgebaut sind, dass aber, da sie nicht kugelsymmetrisch sind, ihr beobachtetes Erscheinungsbild mit dem Blickwinkel, unter dem sie gesehen werden, variiert. Eine wesentliche Rolle spielt dabei ein dichter Staubtorus, der das Schwarze Loch im Zentrum der Galaxie umgibt und es genau dann verdeckt, wenn das System von der Seite beobachtet wird. Astronomen des MPIA gelang jetzt gemeinsam mit Kollegen der Universität Bochum der erste Nachweis solcher Staubtori im Infraroten – ein starkes Argument für die heiß diskutierte Vereinheitlichung der beiden Typen radiolaute Quasare und Radiogalaxien. Grundlage dieser Studie sind hochempfindliche ISOPHOT-Daten.

II Highlights

II.1 Planetenähnliche Objekte im freien Flug

Ende 1995 wiesen Schweizer Astronomen erstmals einen Planeten nach, der einen anderen Stern als die Sonne umläuft. Weitere Entdeckungen folgten, heute sind mehr als 60 so genannte extrasolare Planeten bekannt. Sie alle wurden nur indirekt auf Grund der Schwerkraftwirkung auf ihren Zentralstern nachgewiesen. Direkt beobachten lassen sie sich heute noch nicht, weil sie so nahe an ihrem Zentralstern stehen, dass er sie völlig überstrahlt. Astronomen in Spanien, den USA und am MPIA fanden kürzlich überraschend in einem Sternentstehungsgebiet im Orion Objekte mit Massen in der Größenordnung von 10 Jupitermassen. Da sie keinen Stern umkreisen, werden sie als »frei fliegende Planeten« bezeichnet. Im selben Areal machten sie zudem eine Reihe Brauner Zwerge ausfindig. Aufgrund dieser Beobachtungen lässt sich die Häufigkeit dieser lichtschwachen Himmelskörper ermitteln. Gleichzeitig erhebt sich die interessante Frage, welche Zusammenhänge mit den Planeten bestehen, die an einen Stern gebunden sind.

Astronomen des MPIA hatten bereits Ende 1998 mit dem 3.5-Meter-Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums in Südspanien die 1150 Lichtjahre entfernte Sterngruppe um den Stern Sigma Orionis im nahen Infrarot aufgenommen. Das Feld ist 847 Quadratbogenminuten groß, etwas größer als der Vollmond. Wenig später erhielten spanische Kollegen vom Astrophysikalischen Institut der Kanaren auf Teneriffa im optischen Spektralbereich Aufnahmen des selben Feldes (Abb. II.1). Beim Vergleich der Bilder fielen einige Objekte wegen ihrer ungewöhnlich roten Farbe auf. Um deren Natur zu klären, folgten weitere Beobachtungen, unter anderem am 2.2-Meter-Teleskop auf dem Calar Alto, sowie am UKIRT und an einem der beiden Keck-Teleskope auf Hawaii.

Hierbei gelangen von 64 Objekten photometrische Aufnahmen durch eine Reihe von Filtern, und von 14 Himmelskörpern wurden Spektren gewonnen – bei Helligkeiten von 16.5 bis 22.8 mag im nahen Infrarot (bei ca. 0.9 μm Wellenlänge) ein aufwendiges Unterfangen.

Die Spektren zeigten deutliche Anzeichen von Atmosphären, die exotische Moleküle, wie Titan- und Vanadiumoxid, aber auch Wasserdampf enthalten. Damit und aufgrund ihres geringen Alters von 1–5 Millionen Jahren ließen sich diese Haufenmitglieder als Braune Zwerge mit Spektraltypen zwischen M6 und L4 identifizieren. Ihre Temperaturen liegen zwischen 1700 und 2200 Grad Kelvin.

Häufigkeit Brauner Zwerge und »frei fliegender Planeten«

Braune Zwerge befinden sich in einem Übergangsbereich zwischen Sternen und Planeten. Beträgt die Masse eines Himmelskörpers weniger als etwa 0.07 Sonnenmassen (entsprechend 75 Jupitermassen), so sind in seinem Zentralbereich Temperatur und Druck nicht mehr hoch genug, damit die Fusion von Wasserstoff stattfinden kann. Nur eine Deuterium-Tritium-Fusion wird für kurze Zeit gezündet, die jedoch bald wieder aussetzt. Danach kühlt der Körper aus. Einen solchen Himmelskörper nennt man Braunen Zwerg. Liegt seine Masse unterhalb von etwa 13 Jupitermassen, so ist auch das Deuterium-Tritium-Brennen nicht mehr möglich. Ein solcher Körper wird von vielen Astrophysikern heute als Planet bezeichnet, während nach der klassischen Vorstellung nur solche Körper als Planeten gelten, die in einer Scheibe um einen Stern entstanden sind. Die Definition eines Planeten allein über seine Masse und nicht über den Prozess seiner Entstehung erleichtert zunächst einmal die Arbeit, da man bei Objekten mit planetaren Massen, wie sie jetzt entdeckt wurden, den Entstehungsprozess gar nicht kennt.

Um die Identität der Objekte im Sigma-Orionis-Sternhaufen zu klären, mussten die Astronomen daher deren Massen ermitteln. Das geht in diesem Fall nur über ein Modell, das beschreibt, wie schnell Braune Zwerge und Planeten nach ihrer Entstehung abkühlen. Vorausgesetzt, alle Körper im Sternhaufen sind etwa gleichzeitig entstanden, dann sind jetzt die kleinsten Objekte am kältesten. Ein solches Modell liefert auch einen Zusammenhang zwischen der Farbe eines Himmelskörpers und dessen Masse: Je kleiner er ist, desto kühler, und damit desto röter ist er.

Wie aus anderen Untersuchungen bekannt ist, beträgt das Alter der Sternhaufen im Orion zwischen einer und fünf Millionen Jahre. Die Astronomen rechneten drei Modelle mit unterschiedlichem angenommenen Alter aus und verglichen die Ergebnisse mit den Messdaten. Am besten passten die Werte zu einem Alter von fünf Millionen Jahren (Abb. II.2). Hier reihten sich die Objekte entlang einer Massenlinie auf, die von extrem leucht-schwachen Sternen mit maximal 200 Jupitermassen über den Bereich der Braunen Zwerge bis zu Planeten reicht. Die Masse der masseärmsten unter ihnen beträgt nur etwa 5 Jupitermassen.

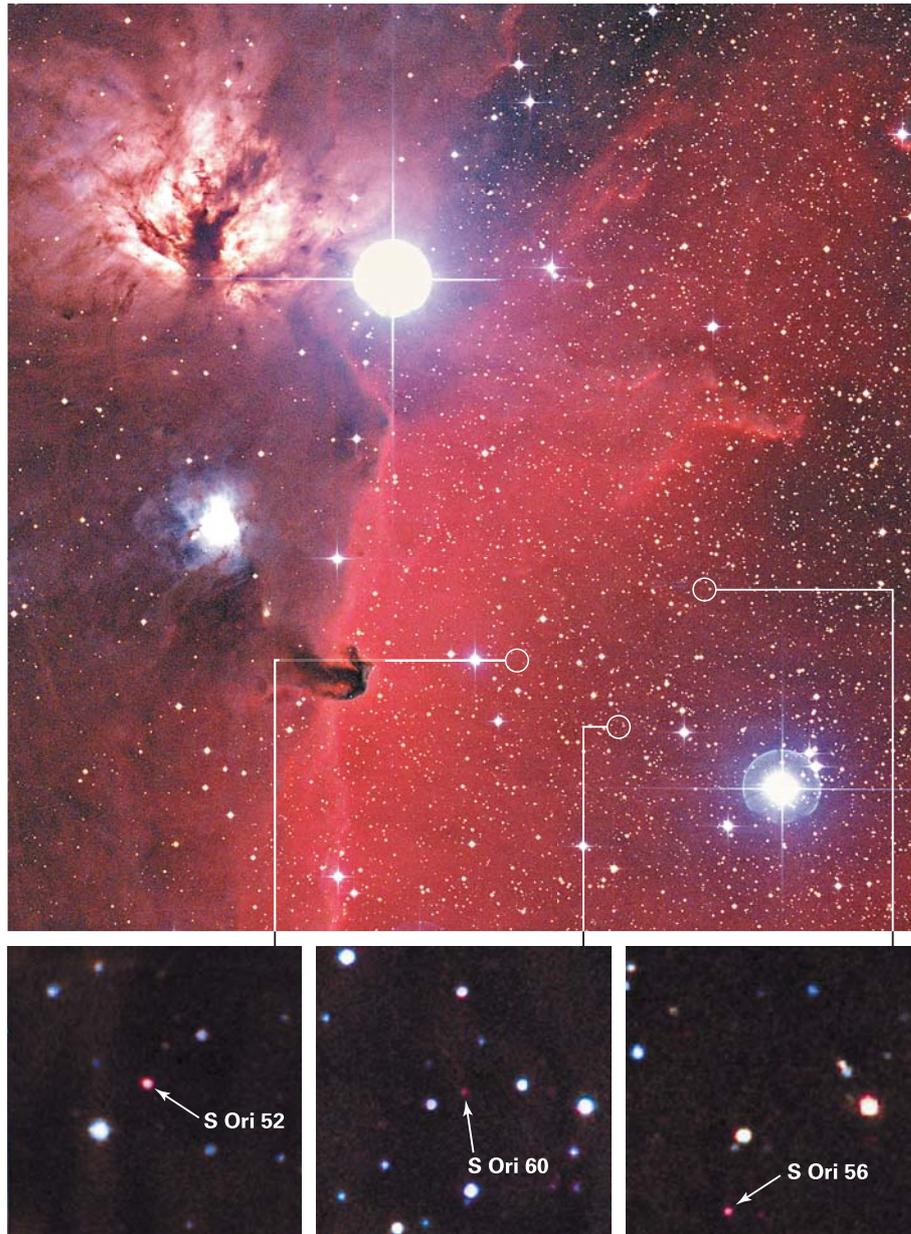


Abb. II.1: In der Nähe des Pferdekopfnebels im Sternbild Orion wurden erstmals freie Braune Zwerge und Planeten entdeckt. (Bild: AAO, Zapatero Osorio)

Eine zentrale Größe der Stellarastronomie ist die Massenfunktion. Sie gibt an, wie hoch der Anteil der Sterne pro Massenintervall ist. Grundsätzlich nimmt dieser Anteil etwa umgekehrt proportional mit der Masse zu. Es gibt also wesentlich mehr kleine als große Sterne. Eine wichtige Frage ist nun: Setzt sich dieses Gesetz, das für einen weiten Massenbereich der Sterne gilt, bis zu den masseärmsten Objekten fort? Die Frage lässt sich nur schwer beantworten, da die Sternzählungen unvollständig werden, wenn man in den Bereich der masseärmsten und somit lichtschwächsten Sterne vordringt.

Im vergangenen Jahr hatten Astronomen des MPIA im Rahmen des Projekts CADIS herausgefunden, dass diese inverse Proportionalität bis herunter zu etwa 0.2 Sonnenmassen gilt (s. Jahresbericht 1999, S. 60). Nach den neuen Beobachtungen des Sigma-Orionis-Haufens scheint sich diese Relation bis in den Bereich der Braunen Zwerge fortzusetzen. Bei einer absoluten Helligkeit im nahen Infraroten von 9 mag (entsprechend Braunen Zwergen mit 0.05 bis 0.08 Sonnenmassen) hat die Verteilung ihr Maximum. Dann fällt sie ab und bleibt über einen weiten Bereich konstant (Abb. II.3).

Aus dieser Leuchtkraftfunktion lässt sich nun mit einem Sternentwicklungsmodell die Massenfunktion ausrechnen. Sie gibt die Häufigkeit der Objekte pro Massenintervall bei ihrer Entstehung an. Da das Alter des Haufens nicht genau bekannt ist, ist diese Umrechnung mit einigen

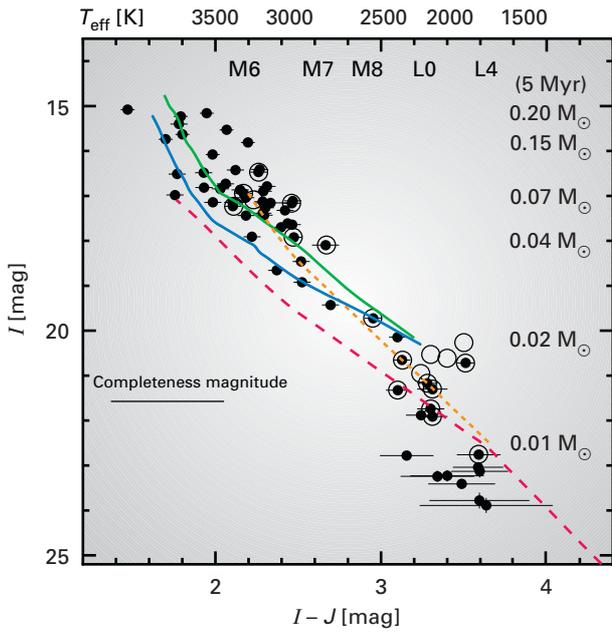


Abb. II.2: Farben-Helligkeits-Diagramm des Sigma-Orionis-Sternhaufens. Die Kurven repräsentieren unterschiedliche Modelle. Die hieraus abgeleiteten Massen (rechte Skala) ergeben sich für ein Alter der Sterngruppe von fünf Millionen Jahren.

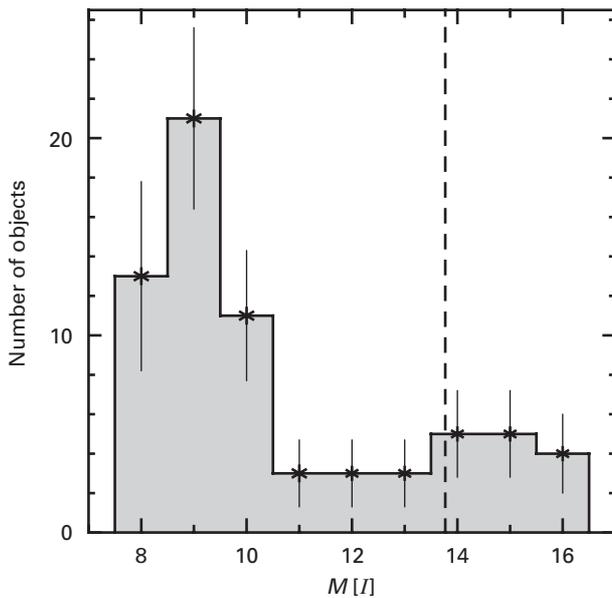


Abb. II.3: Leuchtkraftfunktion der Mitglieder des Haufens. Die gestrichelte Linie kennzeichnet die Vollständigkeitsgrenze der Beobachtungen.

Unsicherheiten behaftet. Dennoch deutet das Ergebnis selbst unter Annahme unterschiedlichen Alters darauf hin, dass die Anzahl der Objekte im Bereich der Braunen Zwerge etwa umgekehrt proportional zur Masse weiter zunimmt. (Abb. II.4)

Extrapoliert man die für Sterne gesicherte Massenfunktion in den Bereich der Planeten, so kommt man zu dem überraschenden Ergebnis, dass es ebenso viele freie

Planeten mit Massen zwischen 1 und 12 Jupitermassen wie Braune Zwerge gibt. Wegen ihrer geringen Massen würde indes ihr Gesamtbeitrag zur Masse aller Sterne nur etwa zehn Prozent ausmachen. Demzufolge müsste es im Umkreis von etwa 30 Lichtjahren um die Sonne 100 bis 200 Braune Zwerge und ebenso viele frei fliegende Planeten geben.

Deren Nachweis liegt an der Grenze der Leistungsfähigkeit derzeitiger Großteleskope. Ob er möglich ist, hängt dabei ganz entscheidend vom Alter der Objekte ab: Je älter sie sind, desto weiter haben sie sich abgekühlt und desto lichtschwächer sind sie. Planeten im Bereich von 1 bis 12 Jupitermassen, die so alt sind wie die Sonne, hätten Temperaturen zwischen 100 und 300 K und absolute Helligkeiten im nahen Infraroten bei 1.2 μm von 20 bis 25 mag. Sie wären selbst innerhalb weniger Lichtjahre kaum auffindbar.

Warum gibt es »frei fliegende Planeten«?

Vieles an den neuen Beobachtungen ist überraschend – die Häufigkeit der entdeckten massearmen Körper und vor allem die Tatsache, dass es überhaupt isolierte Objekte mit planetaren Massen gibt. Gerade dadurch wurden diese Winzlinge erst beobachtbar. Wenn ein Planet einen Stern umkreist, überstrahlt dieser den nahen Begleiter mit seiner viele millionenmal größeren Helligkeit. Außerdem sind die Planeten mit fünf Millionen Jahren noch sehr jung und daher heiß genug, um besonders viel Wärmestrahlung im nahen Infrarotbereich abzugeben. Warum aber gibt es überhaupt freie Planeten?

Nach unserer in den Grundzügen gesicherten Vorstellung entstehen Planeten in Scheiben aus Staub und Gas,

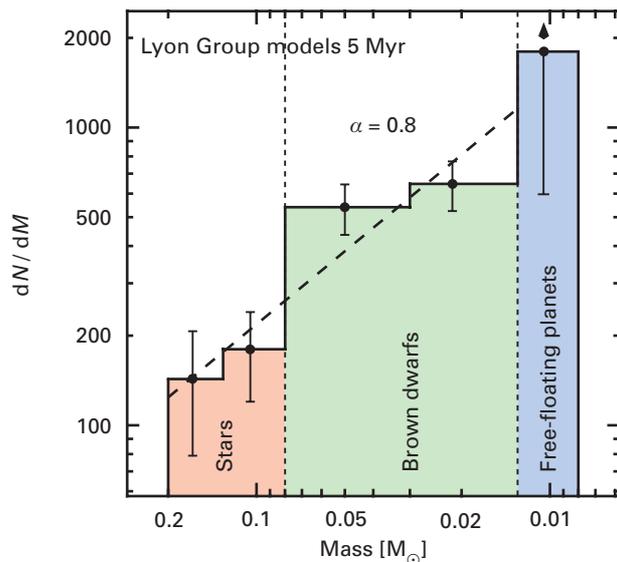


Abb. II.4: Die ursprüngliche Massenfunktion der Mitglieder des Sigma-Orionis-Sternhaufens, berechnet für ein Alter von fünf Millionen Jahren. Die geneigte gestrichelte Linie gibt das beste Modell wieder.

die ihren jungen Zentralstern umgeben. Nach den heutigen Modellen ist es eher unwahrscheinlich, dass sich aus dem Kollaps einer interstellaren Wolke von mindestens einer Sonnenmasse, entsprechend tausend Jupitermassen, ein massearmer isolierter Planet bildet. Dennoch ist es nicht ausgeschlossen. Es erscheint auch möglich, dass es sich bei den entdeckten »Planeten« um verhinderte Sterne oder Braune Zwerge handelt – um Körper also, deren Wachstumsprozess durch einen unbekanntem Vorgang plötzlich zum Stillstand kam. Die Ursache könnte der starke Teilchenwind des nahen, hellen Sterns Sigma Orionis oder eine nahe Supernova-Explosion gewesen sein. Sie könnten die zirkumstellaren Scheiben, aus denen benachbarte entstehende Sterne während ihres Wachstums Materie aufnehmen, zerstört haben.

Ein weiterer Prozess der Entstehung isolierter planetenähnlicher Körper wird durch Computersimulationen belegt, wie sie auch die Theoriegruppe des MPIA durchgeführt hat (s. Jahresbericht 1997, S. 58). Wenn sich in der Entstehung befindliche Planetensysteme im Raum bewegen und dabei einander hinreichend nahe kommen, können sie sich gegenseitig auf Grund ihrer gravitativen

Wechselwirkung Protoplaneten entreißen und diese in den interstellaren Raum schleudern. Schließlich besteht auch die Möglichkeit, dass in einem jungen System einige Planetenbahnen chaotisch verlaufen, so dass ein Mitglied durch die Schwerkraft der anderen aus dem System herauskatapultiert wird. Es ist also denkbar, dass die jetzt gefundenen Einzelgänger Planeten sind, die von ihrem »Heimatstern« losgerissen wurden.

Doch auch mit dieser Erklärung gibt es Probleme. Die auf diese Weise entstandenen freien Objekte sollten sehr hohe Geschwindigkeiten besitzen und den Haufen, in dem sie entstanden sind, schnell verlassen. Der beschriebene Prozess sollte daher eher vereinzelt auftretende freie Körper hervorbringen, nicht jedoch in so großer Zahl, wie sie im Sigma-Orionis-Haufen gefunden wurden.

Diese aufregende Entdeckung wirft also ein ganz neues Licht auf die Entstehung von Sternen und Planeten und deutet auf Vorgänge hin, an welche die Astrophysiker bislang nicht gedacht hatten. Sie zeigt auch, dass über die Definition von Himmelskörpern wie Planeten, Brauen Zwergen und Sternen neu nachgedacht werden muss.

II.2 Die drei Phasen der Staubheizung in ultraleuchtkräftigen Infrarotgalaxien

Ultraleuchtkräftige Infrarot-Galaxien (kurz: ULIRGs) strahlen fast ihre gesamte Leuchtkraft als warme Staubemission im fernen Infrarot ab. ULIRGs sind Paare kollidierender und in einem fortgeschrittenen Stadium der Verschmelzung befindlicher Galaxien. Die möglichen Quellen ihrer ultrahohen Staubleuchtkraft sind sowohl eine Vielzahl in den Galaxien entstehender junger Sterne als auch in ihren Zentren eingebettete Quasare. Im Verlauf dieser Entwicklung sollten die verschiedenen Heizprozesse den ursprünglich kalten Staub der Muttergalaxien in Stufen erwärmen. Um derartige Vorgänge zu enthüllen, ist eine vollständige Erfassung der Staubemission im gesamten Infrarot- und Submillimeterbereich erforderlich. Astronomen des MPIA haben im Berichtsjahr gemeinsam mit Kollegen der Universität Bochum die bislang umfangreichste photometrische Studie an ULIRGs durchgeführt. Damit gelang es ihnen, drei Phasen der Staubheizung zu identifizieren und Zusammenhänge mit den zentralen Schwarzen Löchern, der Sternentstehung und dem kalten zirusähnlichen Staub herzustellen.

Eine der sensationellen Entdeckungen des Infrarotsatelliten IRAS Mitte der achtziger Jahre war die bis dahin unbekannte Klasse der ultraleuchtkräftigen Infrarotgalaxien. Im Unterschied zu normalen Galaxien strahlen ULIRGs über 90 Prozent ihrer Energie als Staubemission im fernen Infraroten zwischen 60 μm und 100 μm Wellenlänge ab. Gleichzeitig verwehren die großen Staubmassen im sichtbaren Bereich weitgehend den Blick auf Vorgänge im Innern. Hochempfindliche Aufnahmen mit exzellenter Bildschärfe im nahen Infrarot mit dem Weltraumteleskop HUBBLE zeigten, dass ULIRGs kollidierende oder sogar in einem fortgeschrittenen Stadium verschmelzende Galaxien sind (Abb. II.5).

Solche extrem eng wechselwirkenden Systeme zeigen eine deutlich erhöhte Sternentstehungsrate. Theoretische Studien trugen hier wesentlich zum weiteren Verständnis bei: Durch die starken Gezeitenkräfte wird die Drehimpulsbarriere, welche die interstellaren Gaswolken auf einer ansonsten regulären Bahn um das Massezentrum hält, aufgehoben, so dass große Gasmengen auf die sich neu bildenden Gravitationszentren einstürzen. Die dort zusammenstoßenden Wolken verdichten sich und bilden viele einzelne Kondensationen, aus denen massereiche leuchtkräftige Sterne entstehen. Galaxien mit solchen schlagartigen Ausbrüchen von Sternentstehung nennt man Starburst-Galaxien.

Darüber hinaus kann das einstürzende Gas auch die Akkretionsscheibe eines bereits vorhandenen Schwarzen Lochs mit »Nahrung« versorgen. In der Tat ließ sich in etwa einem Drittel aller ULIRGs anhand der beobachteten

Spektrallinien ein aktiver Kern, ähnlich wie bei Seyfert-Galaxien und Quasaren mit einem Schwarzen Loch nachweisen. Weiteren theoretischen Überlegungen zufolge könnten die ausgebrannten Supersternhaufen selbst zu einem neuen Schwarzen Loch zusammenstürzen, so dass sich aus einer Starburst-Galaxie ein aktiver Kern bildet.

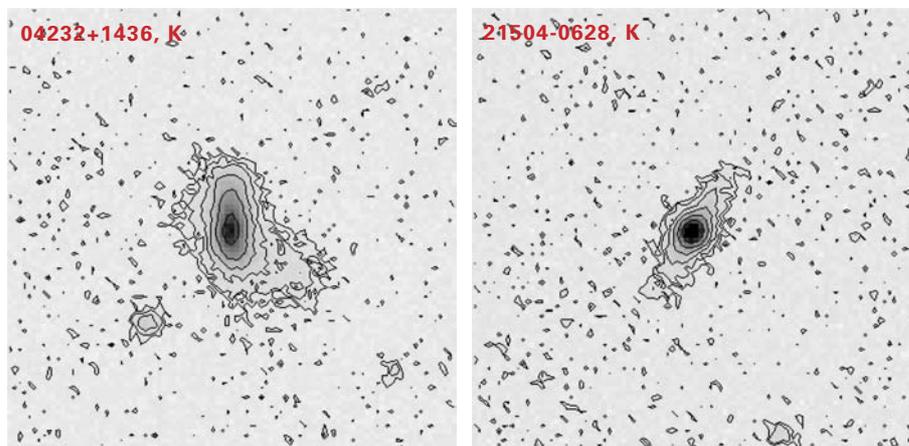
Mit dem interstellaren Gas ist Staub in einem Mengenverhältnis 1:100 vermischt. Er absorbiert sehr effizient die kurzwellige Strahlung der heißen Sterne und aktiven Galaxienkerne und strahlt die absorbierte Energie bei größeren Wellenlängen im Infraroten wieder ab. Ebenso wie das Gas wird auch der Staub bei einer Galaxienwechselwirkung in den dichten Gebieten konzentriert. Dadurch verwehrt der Staub bei kurzen Wellenlängen den direkten Blick auf die Vorgänge im Innern. Um diese verborgenen Vorgänge zu erforschen, bietet es sich deshalb an, die Staubstrahlung selbst zu untersuchen. Dies kann nur im Infraroten erfolgen.

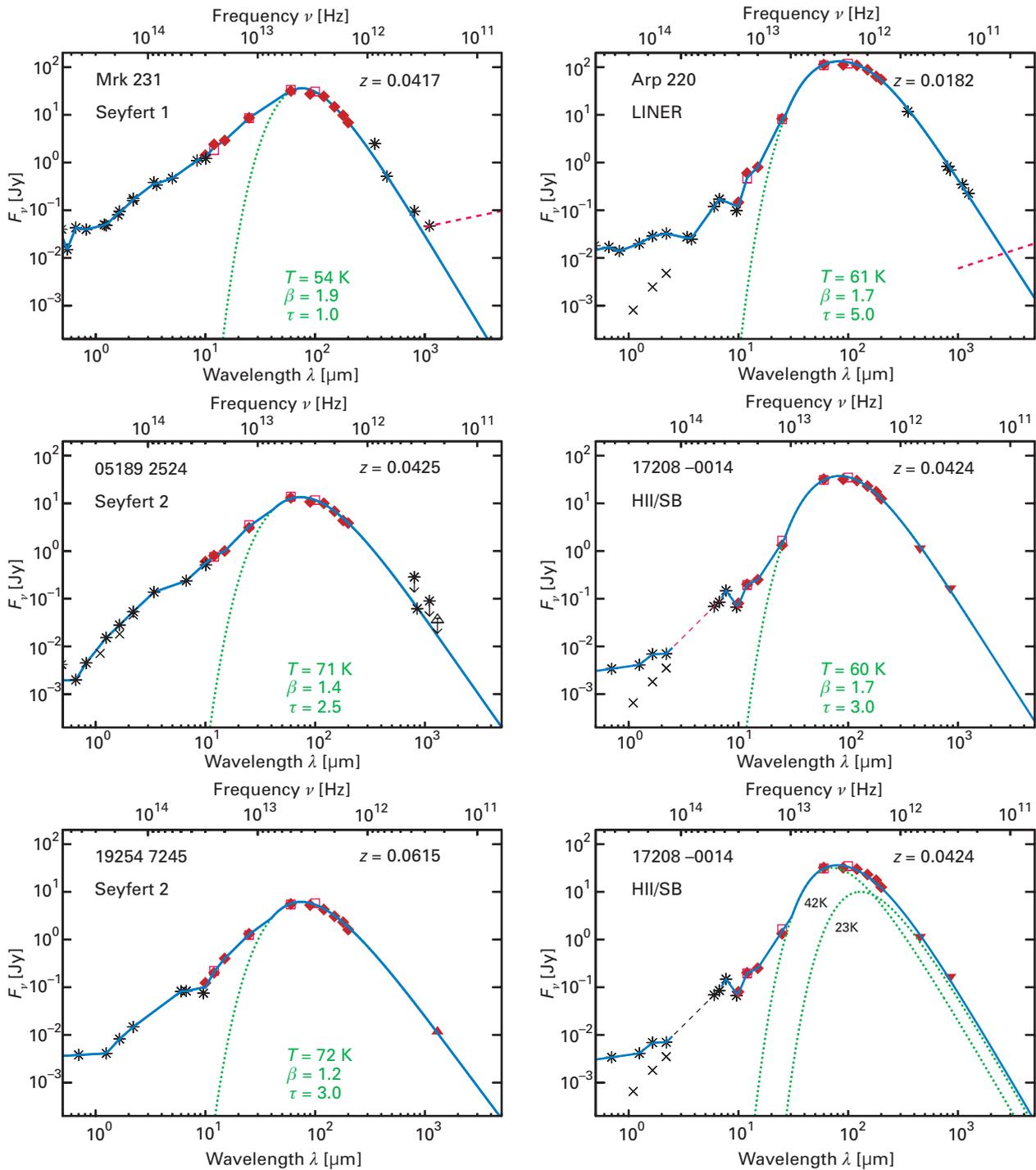
Neben der Kontroverse um die dominante Energiequelle der ULIRGs – Starburst oder Quasar – stellt sich auch die Frage, ob ULIRGs generell oder zumindest in einem frühen Entwicklungsstadium kalten Staub besitzen, ähnlich dem Infrarotzirus in unserer Milchstraße. Untersuchungen im gesamten Infrarotbereich von 1 μm bis 1000 μm sollten entscheidende Hinweise auf das Zusammenspiel der Staubkomponenten und ihrer Heizquellen liefern. Dabei erwartet man vom nahen und mittleren Infrarotbereich neue Hinweise auf Quasare, während Starbursts und kühler Staub die Emission im Ferninfrarot- und Submillimeterbereich charakterisieren.

In den Jahren 1996–1998 wurden 41 der nächsten und hellsten ULIRGs im Bereich zwischen 10 μm und 200 μm mit ISOPHOT photometrisch beobachtet. (Die Objekte sind zu weit entfernt und zu kompakt, um sie bei diesen Wellenlängen detailliert abzubilden, daher bestimmt man ihre integrale Helligkeit photometrisch und analysiert die spektrale Energieverteilung über einen großen Wellenlängenbereich.) Hinzu kamen für knapp die Hälfte der Quellen Beobachtungen am James-Clerk-Maxwell-Teleskop auf Hawaii bei 450 μm und 850 μm mit dem Instrument SCUBA, sowie bei 1300 μm mit dem Submillimeterteleskop SEST der ESO auf La Silla. Darüber hinaus konnten die Forscher des Instituts die spektakuläre Antennengalaxie detailliert studieren, die sich vermutlich gerade zu einer ULIRG entwickelt. Und auf dem Calar Alto gelangen mit der Kamera MAGIC am 2.2-Meter-Teleskop Aufnahmen im nahen Infrarot bei 1.2 μm und 2.2 μm . Auch sie zeigen irreguläre Strukturen und ausgedehnte Schweife als Folge der Galaxienkollisionen (Abb. II.6). Damit steht jetzt erstmalig eine statistisch brauchbare und konsistente Infrarot-Submillimeter-Photometrie von 22 ULIRGs zur Verfügung.



Abb. II.5: ULIRGs, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE. (Foto: NASA/ESA).





▲ **Abb. II.7:** Spektrale Energieverläufe von einigen ULIRGs. Rechte Spalte: ULIRGs mit gleichmäßigem Intensitätsanstieg im nahen und mittleren Infrarot, rechte Spalte: ULIRGs mit Plateau und anschließendem steilen Anstieg. Auch auf der langwelligen Seite des Maximums fällt die Intensität unterschiedlich steil ab (linke

Spalte, oben steil, unten flach). Wie am Beispiel IRAS 17208-0014 mit mittlerem β -Wert ($\beta < 2$) illustriert, können Spektren alternativ auch durch mehrere Planck-Funktionen mit festem $\beta = 2$ gefittet werden.

◀ **Abb. II.6:** Zwei der in der neuen Studie enthaltenen ULIRGs, aufgenommen bei der Wellenlänge 2.2 μm mit der Kamera MAGIC am 2.2-Meter-Teleskop des Calar Alto.

Drei Phasen: Heißer, warmer und kalter Staub

Die spektralen Energieverteilungen (Abb. II.7) zeigen vier wesentliche Merkmale:

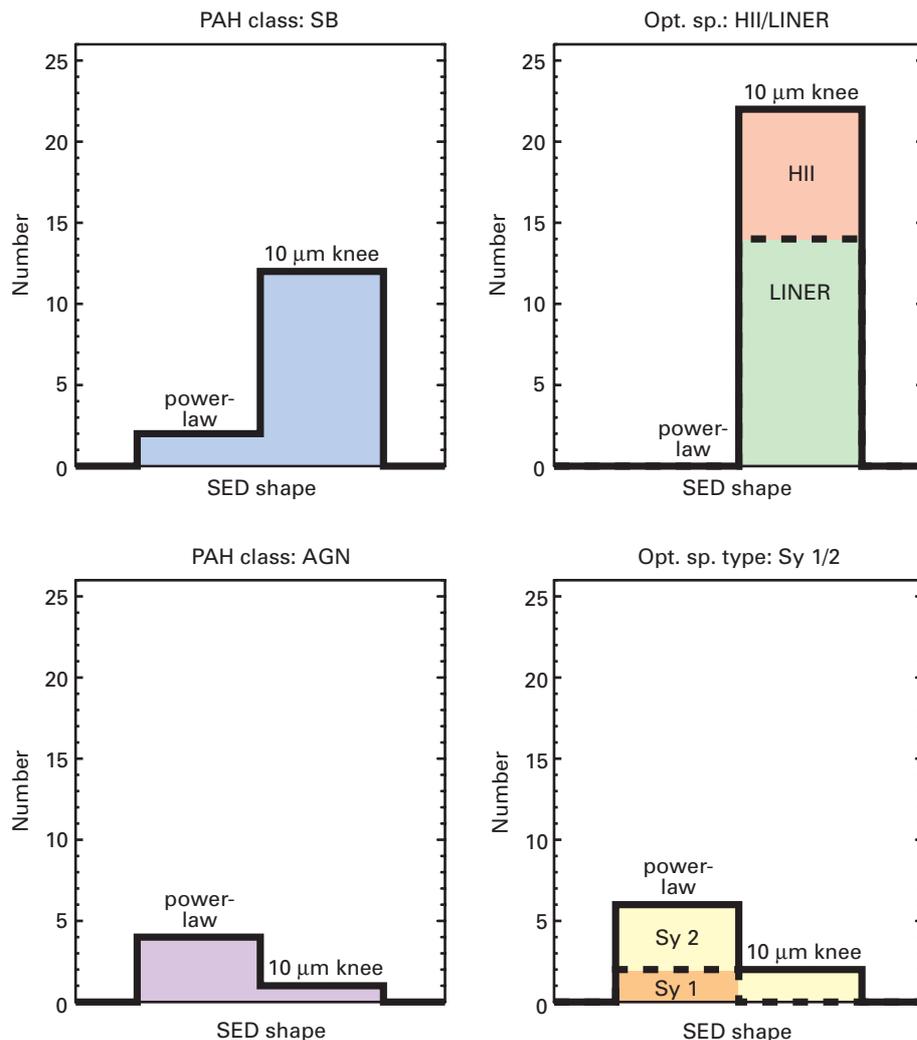
1. Das Maximum der gemessenen Intensität liegt stets im fernen Infrarot zwischen $60\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$, entsprechend einer Staubtemperatur von etwa 50 Kelvin. Dies ist offenbar für alle ULIRGs charakteristisch.

2. Im nahen und mittleren Infrarot zeigen die Spektren zwei unterschiedliche Grundformen: Die erste Form zeichnet sich durch einen steilen aber gleichmäßigen Anstieg der gemessenen Intensität aus. Die Strahlung stammt von heißem Staub mit einer Temperatur im Bereich von etwa 100 bis 1000 Kelvin. Die zweite Form zeigt einen flachen Verlauf zwischen $1\ \mu\text{m}$ und $10\ \mu\text{m}$, gefolgt von einem abrupten sprunghaften Anstieg zwischen $10\ \mu\text{m}$ und $40\ \mu\text{m}$. Möglicherweise ist die Strahlung des heißen Staubes stärker extinguiert, so dass das Licht der weniger extinguierten Außenbereiche mit normalem »blauem« Spektrum den »geröteten« Anteil überstrahlt. Während die erste Form nur bei ULIRGs mit

aktivem Kern beobachtet wird, gehören solche ULIRGs, die ausschließlich Anzeichen von Starbursts zeigen, alle zum zweiten Typ (Abb. II.8). Es kommen auch Mischformen und Überlappungen vor. Diese beiden Spektralformen bieten ein schönes und auch auf schwache Quellen anwendbares Kriterium, um Quasare in ULIRGs mit Hilfe von Photometrie im nahen und mittleren Infrarot aufzuspüren.

3. Auf der langwelligen Seite des Intensitätsmaximums, also im extremen Ferninfrarot- und Submillimeterbereich, lassen sich die von aktiven Kernen und Starbursts dominierten ULIRGs nicht unterscheiden (Abb. II.9). Dies deutet darauf hin, dass die Heizung des 50 K warmen Staubes (und möglicherweise weiterer

Abb. II.8: Vergleich der verschiedenen ULIRGs-Klassifikationen. Für den Intensitätsanstieg im nahen und mittleren Infrarot findet man überwiegend ein steiles Potenzgesetz bei Seyfert-Galaxien (unten) und einen flachen Anstieg bei Starburst-Galaxien (oben). Dies demonstriert die Konsistenz mit der Klassifikation im Optischen (rechts) und im mittleren Infrarot (links).



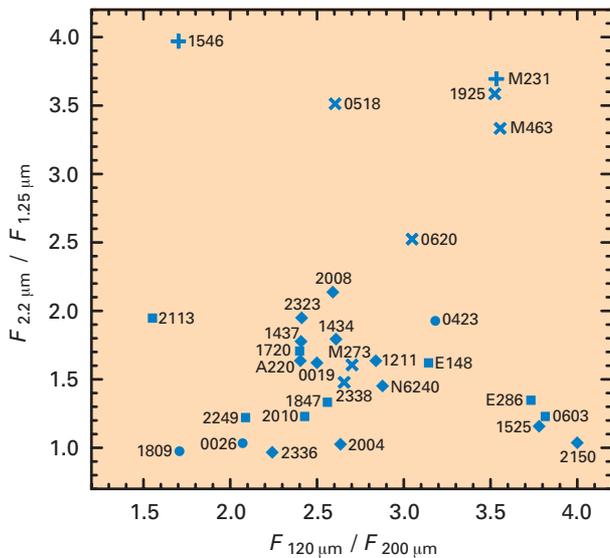


Abb. II.9: Zwei-Farben-Diagramm für ULIRGs. Die Kreuze bezeichnen Seyfert-Galaxien mit zentralen Schwarzen Löchern, die übrigen Symbole stehen für Starburst-Galaxien. Während die meisten Seyfert-Galaxien von den übrigen ULIRGs durch die Nahinfrarot-Farben (y -Achse) gut unterschieden werden können, scheint ein Schwarzes Loch die Verteilung der Ferninfrarot-Farben (x -Achse) nicht zu beeinflussen.

kühlerer Komponenten) unabhängig vom Beitrag des zentralen Schwarzen Lochs ist, also im Wesentlichen von Starbursts stammt. Die Masse des warmen und kühleren Staubes beträgt das Hundert- bis Tausendfache derjenigen des heißen Staubes.

4. Unabhängig von der Einteilung in aktive Kerne und Starbursts findet man im extremen Ferninfrarot- und Submillimeterbereich Unterschiede für den Intensitätsabfall mit zunehmender Wellenlänge: Er zeigt flache und steile Formen.

Solche Unterschiede sind auch für andere Galaxientypen gefunden worden. Ihre Interpretation ist heute Gegenstand intensiver Forschung. Die spektrale Strahlungsverteilung des Staubes lässt sich gut durch so genannte modifizierte Planck-Spektren beschreiben, wobei die Modifizierung von den Staubeigenschaften abhängt. Kontrovers diskutiert werden zwei Hauptursachen für die Variation der Steilheit des langwelligen Rayleigh-Jeans-Astes: Zum einen hängt diese Steilheit von der Verteilung der Staubkorngröße ab, was durch den Emissivitätsparameter β beschrieben wird. (Die Emissivität gibt die Strahlungseffizienz bei einer bestimmten Wellenlänge relativ zu einem perfekten Schwarzen Körper an.) Große Staubkörner können bei langen Wellenlängen besser emittieren als kleine; für eine Staubwolke mit überwiegend großen Teilchen mit Durchmessern bis zu etwa $3 \mu\text{m}$ erwartet man einen relativ flachen Verlauf der Spektren und β -Werte nahe bei eins. Typische Staubwolken in unserer Milchstraße besitzen dagegen einen steileren Rayleigh-Jeans-Ast mit

β nahe bei zwei, enthalten also überwiegend kleine Staubkörner unter $1 \mu\text{m}$ Durchmesser.

Zum anderen könnte ein flacher Verlauf des Rayleigh-Jeans-Astes auch durch eine Überlagerung mehrerer (modifizierter) Planck-Kurven mit verschiedenen Temperaturen zustande kommen. Dies bestätigen auch räumlich aufgelöste Beobachtungen der Antennengalaxie (s.u.), die als entstehende ULIRG angesehen wird.

Aufgrund der integralen Spektren alleine lässt sich diese Kontroverse nicht klären. Die meisten normalen Spiralgalaxien ebenso wie die so genannten Markarian-Galaxien mit intensivem Strahlungsfeld einer zentralen Akkretionsscheibe besitzen Werte von β nahe zwei. Es ist deshalb naheliegend anzunehmen, dass auch in den Staubwolken in Starburst-Galaxien die Staubkörner im Durchschnitt klein sind. Falls dieser Wert für β für ULIRGs ebenfalls gilt, dann besitzen diejenigen mit flachem Rayleigh-Jeans-Ast verschiedene Staubkomponenten unterschiedlicher Temperatur von warm bis kalt.

Angesichts der komplexen optischen Morphologie erscheint es auch plausibel, dass die Beschreibung des Staubgehalts durch nur eine (modifizierte) Planck-Funktion mit einer einzigen Temperatur zu einfach ist. Andererseits herrschen in den ULIRGs zweifelsfrei ganz besondere Bedingungen, signalisiert durch die riesige Leuchtkraft bei gleichzeitig sehr hoher Extinktion. Deshalb könnten die Staubeigenschaften durchaus exotisch sein und große Partikel könnten überwiegen. Anschaulich und etwas übertrieben formuliert: ein Sandhaufen im Kosmos?

In der Tat wären in diesem Falle die Staubwolken so dicht, dass selbst die langwellige Ferninfrarot-Strahlung nicht frei nach Außen entweichen kann. ULIRGs wären demnach selbst bei $100 \mu\text{m}$ optisch dick. Verwerfen kann man diese ungeheuer anmutende Vorstellung jedenfalls noch nicht ohne Weiteres.

Ein wichtiger Schritt zur Klärung dieser Frage gelang den Forschern am MPIA durch den Vergleich der Linienstärken aromatischer Kohlenwasserstoffe mit der Stärke des Submillimeter-Kontinuums. Dieser Vergleich lieferte ein starkes Argument gegen die physikalische Beschreibung der Ferninfrarot-Submillimeter-Spektren mit nur einer einzigen Planck-Funktion (s.u.).

Somit kann nun aus dem nachgewiesenen gesamten Staubgehalt erstmals ein bereits Ende der achtziger Jahre vermutetes vollständiges Modell der ULIRGs belegt werden. Es besteht im Wesentlichen aus drei Bausteinen, wobei die Staubkomponenten und ihre Temperaturen als Indikatoren für physikalische Prozesse und Entwicklungszustände dienen:

1. Heißer Staub mit Temperaturen von 100 bis 1000 K. (Die höchsten Temperaturen sind nahe der Verdampfungsgrenze des Staubes.) Er wird von der Strahlung der Akkretionsscheibe des Schwarzen Loches geheizt.

2. Warmer Staub um 50 K. Er verteilt sich auf die großen Sternentstehungsgebiete der Galaxie und wird

auch überwiegend von jungen, massereichen Sternen erwärmt.

3. Kalter Staub um 20 K. Er entspricht den Zirkus-Staubfilamenten in unserer Milchstraße und befindet sich außerhalb der aktiven Regionen. Liegen diese kalten Wolken in der Nähe der aktiven Zentren, dann müssen sie dichter sein als der dünne Zirkus, um ausreichend gegen die Erwärmung durch das starke Strahlungsfeld geschützt zu sein. Diese dichten kalten Staubkomplexe könnten ein noch nicht entzündetes Reservoir für weitere Starburst-Aktivität darstellen.

Sicherlich sind noch weitere Bestätigungen für dieses Dreistufenmodell wünschenswert. Aber es bietet einen Rahmen, um weitere Forschungsergebnisse sinnvoll zu interpretieren.

Aromatische Kohlenwasserstoffe

Mit dem Spektrographen ISOPHOT-S wurden neue Erkenntnisse über die Eigenschaften Polyzyklischer Aromatischer Kohlenwasserstoffe (engl. Polycyclic Aromatic Hydrocarbonates, PAHs) in unserer Milchstraße und in anderen nahen Galaxien gewonnen (siehe Jahresbericht 1999, S. 24). Insbesondere sprechen die Beobachtungen für die allgegenwärtige Existenz der PAHs im interstellaren Medium. Besonders interessant ist das prominente PAH-Emissionsband bei 7.7 μm . Die Stärke dieses Spektralbandes relativ zum Kontinuum im mittleren und fernen Infrarot lieferte ein wichtiges Kriterium für die Dominanz von aktiven Kernen oder Starbursts in ULIRGs.

Nun zu dem weiter oben angesprochenen neuen Ergebnis: Der langwellige Teil der spektralen Energie-

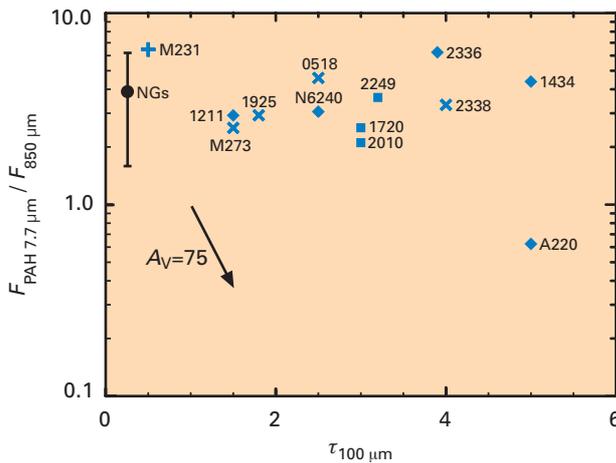


Abb. II.10: Das Verhältnis PAH/850 μm , aufgetragen gegen die optische Dicke τ . Bis auf eine Ausnahme (Arp 220) liegen die Werte für ULIRGs in einem relativ schmalen horizontalen Streifen bei 5 ± 2 . Für normale Galaxien liegen sie im gleichen Bereich (vertikaler Balken links). Die ULIRGs zeigen mit wachsendem τ keine Abnahme parallel zur Pfeilrichtung. Dies spricht gegen die Beschreibung der spektralen Energieverteilung mit nur einer Planck-Kurve.

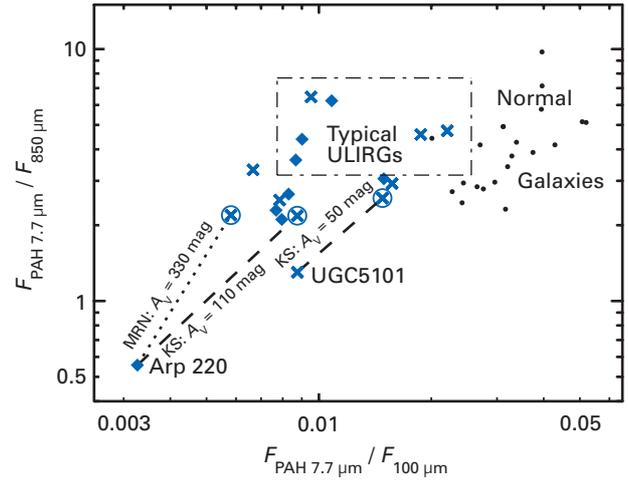


Abb. II.11: Zwei-Farben-Diagramm für ULIRGs und normale Galaxien. Das gestrichelte Rechteck deutet den Bereich an, in dem ULIRGs (außer Arp 220 und UGC 5101) nach Korrektur mit bekannten Extinktionswerten liegen. Arp 220 und UGC 5101 haben deutlich kleinere PAH/850- μm -Werte, Arp 220 sogar auch deutlich kleinere PAH/100- μm -Werte, als die übrigen ULIRGs. Die gepunktete und gestrichelte Linie zeigen für zwei Staubmodelle (MRN und KS) die Verschiebung durch Extinktion an. Die Kreuze mit Kreis zeigen die mögliche nicht extinguierte Lage nahe bei den typischen ULIRGs.

verteilungen ($> 60 \mu\text{m}$) kann mit nur einer (modifizierten) Planck-Funktion mit einer einzigen Temperatur angepasst werden. Falls sich dadurch der Staubgehalt der ULIRGs wirklich adäquat beschreiben lässt, ergibt sich aus dem Planck-Fit an die detaillierten spektralen Energieverteilungen automatisch auch die optische Dicke τ (τ ist das Maß für die Lichtabschwächung durch Staub bei den einzelnen Wellenlängen). Die für 100 μm Wellenlänge abgeleitete optische Dicke τ nimmt Werte im Bereich von 0.5 bis über 5 an, wobei Werte größer als eins bereits beachtlich hoch sind. In diesem Fall üben die Staubwolken auch im mittleren Infrarot eine enorme Abschwächung aus. Da die PAHs offenbar mit dem interstellaren Medium durchmischt sind, sollte die Stärke ihrer Emissionsbanden signifikant von der Extinktion betroffen sein. In diesem Fall erwartet man für diejenigen ULIRGs mit hohem τ eine Abnahme der relativen PAH-Stärke. Die Daten zeigen hingegen keine solche Korrelation (Abb. II.10). Vielmehr ist die beobachtete relative PAH-Stärke unabhängig von der modellierten optischen Dicke – also kann das Ein-Komponenten-Model keine adäquate Beschreibung für den Staubgehalt der ULIRGs sein.

Noch viel aufregender ist folgende Entdeckung: Bis auf einige Ausnahmen ist das Verhältnis zwischen der PAH-Linienstärke und dem 850- μm -Kontinuum nicht nur unabhängig von der modellierten optischen Dicke, sondern es liegt in einem Wertebereich mit überraschend geringer Streuung, quasi wie eine »Materialkonstante« des interstellaren Staubes (Abb. II.11). Um diese Vermutung zu untermauern, durchforsteten die Astronomen des MPIA die ISO- und SCUBA-Archive nach PAH- und 850- μm -

Daten für weitere, meist normale Galaxien. In der Tat stellt sich heraus, dass die PAH-Stärke relativ zum Submillimeterfluss für fast alle bislang beobachteten Galaxien in einem wohldefinierten engen Wertebereich liegt.

Vergleicht man dagegen das Verhältnis zwischen der PAH-Linienstärke und dem 100- μm -Kontinuum, so zeigen sich Unterschiede: Die ULIRGs haben kleinere Werte als die normalen Galaxien (Abb. II.11). Dies lässt sich dadurch erklären, dass die ULIRGs eine höhere Staubtemperatur besitzen als die normalen Galaxien und daher bei 100 μm intensiver strahlen. Dies kann auch als zusätzlicher Hinweis darauf gedeutet werden, dass die PAHs offenbar nicht so sehr mit dem warmen durch Starbursts geheizten Staub assoziiert sind, sondern eher mit dem kalten Staub im Zirrus (oder in dichten Molekülwolken), der im Submillimeterbereich hell strahlt.

In Abb. II.11 fallen aber sofort zwei Ausnahmen auf, die besonders niedrige relative PAH-Stärken zeigen. Diese sind die Folge hoher Extinktion sogar im mittleren Infraroten. Die Extinktion in beiden ULIRGs, UGC 5101 und insbesondere Arp 220, erreicht ungeheuer hohe Werte.

Dies demonstriert eindrucksvoll, dass das Intensitätsverhältnis der PAH-Linienbanden zum Kontinuum im Submillimeterbereich auch als neue Methode zur Untersuchung hoher Extinktion eingesetzt werden kann: Während die PAH-Emission gegen Extinktion im mittleren Infrarot empfindlich ist, ist die Strahlung bei 850 μm Wellenlänge immer optisch dünn, so dass ihre Messung es erlaubt, auf den Inhalt der gesamten Staubsäule zu normieren. Gerade diese Eigenschaft macht den Vorteil des neuen Ansatzes gegenüber bisher bekannten Verfahren aus, bei denen die Extinktion ausschließlich bei deutlich kürzeren Wellenlängen bestimmt wird, also möglicherweise nur an der Oberfläche der Staubsäule »gekratzt« wird.

Ein versteckter Quasar in Arp 220?

Arp 220, in einer Entfernung von ca 200 Mio. Lichtjahren, ist die am nächsten gelegene und wohl am meisten untersuchte ULIRG. Bei optischen Wellenlängen nicht zugänglich, lassen sich auf Bildern im nahen Infrarot zwei Galaxienkerngebiete mit 0,8 projiziertem Abstand (entsprechend 800 Lj) ausmachen. Zwar wurde in den achtziger Jahren mit Nahinfrarot-Spektroskopie eine für aktive Kerne typische breite Linie gemessen, aber ihre Leuchtkraft war so gering, dass die zahlreichen späteren Beobachtungen das Bild von Starbursts als dominierende Energiequelle für diesen ULIRG-Klassiker immer stärker favorisierten.

Auf Arp 220 wirft nun die Extinktion von 150 Größenklassen im Optischen (entsprechend einer Abschwächung um einen Faktor 10^{60}) ein gänzlich anderes Licht. Der Schlüssel zur Interpretation liegt in der Korrektur dieser enormen Extinktion. Erst damit erhält man die ungerötete wahre spektrale Energieverteilung. In ihrer Analyse zeigen die Forscher am MPIA, dass nach Entrötung so-

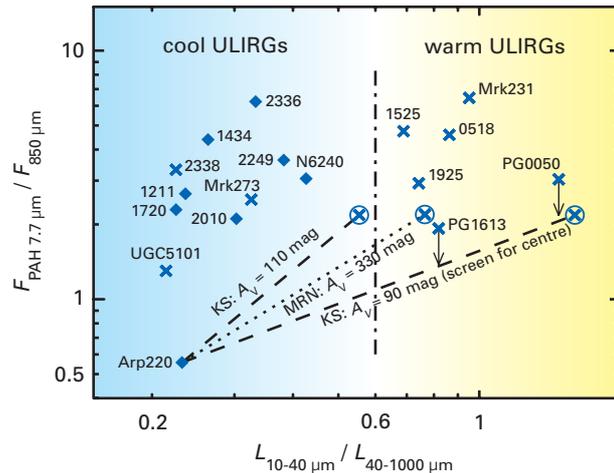


Abb. II.12: Zwei-Farben-Diagramm für ULIRGs. Nach der Entrötung nimmt Arp 220 ähnliche PAH/850- μm -Werte an, wie eine typische ULIRG. Je nach Staubmodell und Verteilung (MRN, KS, screen) liegt Arp 220 im Bereich der so genannten warmen ULIRGs mit starken aktiven Kernen oder der Quasare.

wohl die Leuchtkraft im mittleren Infrarot als auch das Verhältnis von Mittel- zu Ferninfrarot-Leuchtkraft tatsächlich Werte annimmt, wie man sie bislang nur für Quasare und aktive Kerne kennt (Abb. II.12).

Diese Schlussfolgerungen stehen auch in Übereinstimmung mit aktuellen Messungen des Röntgensatelliten CHANDRA, aufgrund derer Astronomen aus Großbritannien und den USA ebenfalls untrügliche Hinweise auf einen Quasar in einem oder gar beiden Kernen in Arp 220 finden. Diese neuen, mit zwei unabhängigen Methoden erzielten Befunde stützen sich gegenseitig und lassen die Diskussion um versteckte Quasare weiter aufleben. Sie zeigen, wie extrem die Absorptionenwirkung des Staubes unsere Sicht der kosmischen Phänomene verändern kann.

Die Antennengalaxie – eine entstehende ULIRG

Das mit 70 Mio. Lichtjahren dem Milchstraßensystem am nächsten gelegene kollidierende Paar gasreicher Spiralgalaxien, wegen der Form seiner spektakulären Gezeitenarme auch Antennengalaxie genannt, bilden NGC 4038 und NGC 4039 (Abb. II.13). Während die Sterne bei der Galaxienkollision durch elastische Stöße aus der Scheibe herausgeschleudert werden können und so die Gezeitenarme bilden, erleidet die interstellare Materie inelastische Stöße und konzentriert sich im gemeinsamen Zentralbereich. Sie wird zusammengedrückt, so dass schließlich in der »Knautschzone« der beiden Galaxien Abermillionen von neuen Sternen entstehen. Viele dieser Sternentstehungsgebiete liegen noch tief in Staub eingebettet, so dass sie nicht im Optischen, sondern erst bei größeren Wellenlängen im mittleren Infraroten, bei denen der Staub transparent wird, sichtbar sind. Auch die Staubstrahlung im Ferninfrarot- und Submillimeterbereich



Abb. II.13: Die Antennengalaxie im sichtbaren Bereich. Auf der rechten Aufnahme des HST (Ausschnitt) erkennt man deutlich die kollidierenden Staubwolken und die vielen Nester junger, blauer Sterne. (Bild: NASA/ESA)

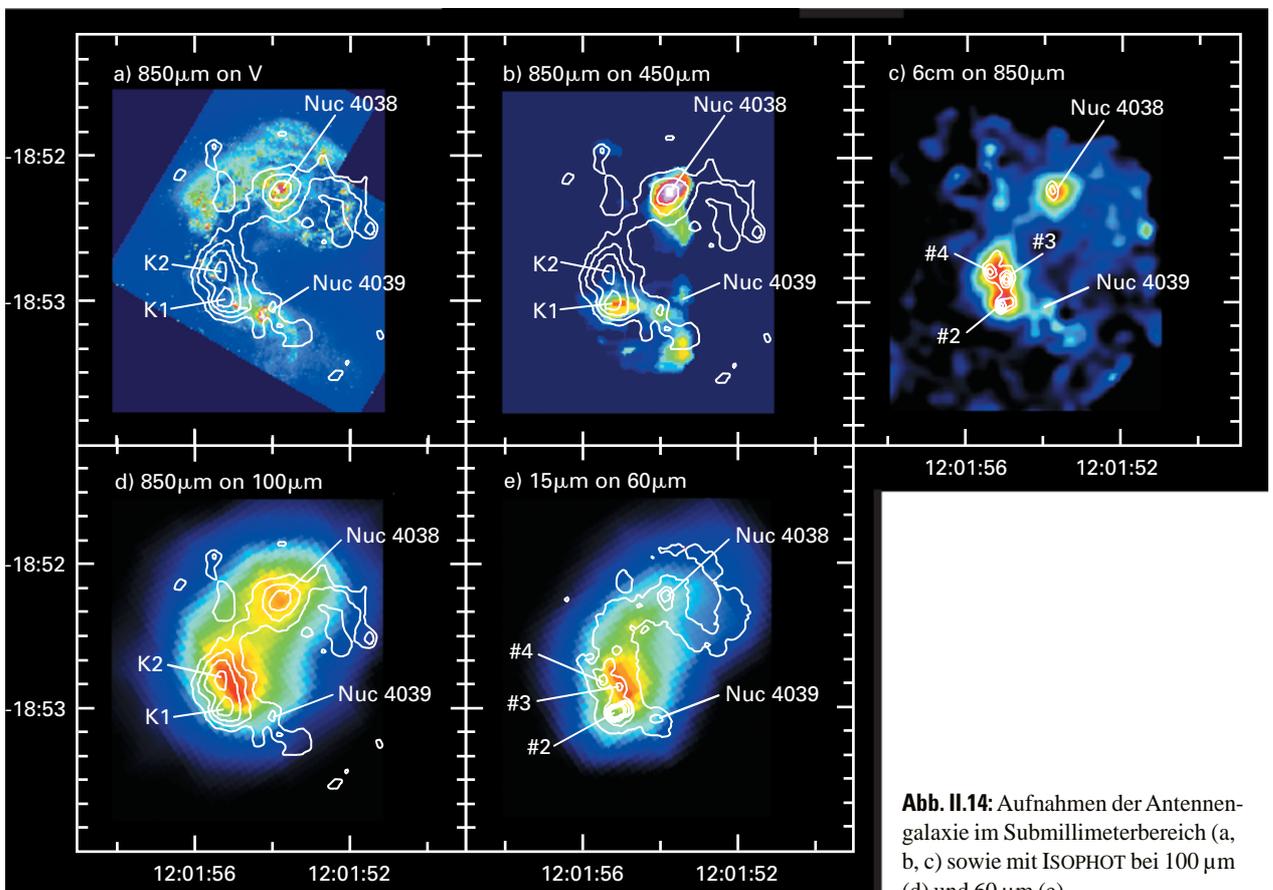


Abb. II.14: Aufnahmen der Antennengalaxie im Submillimeterbereich (a, b, c) sowie mit ISOPHOT bei $100\mu\text{m}$ (d) und $60\mu\text{m}$ (e).

ermöglicht anhand ihrer Farbe und Leuchtkraft aufschlussreiche Hinweise auf die verborgenen Sternentstehungsvorgänge.

Schon vor wenigen Jahren hatten Astronomen des MPIA mit ISOPHOT die Infrarotleuchtkraft des Systems im Bereich von $10\ \mu\text{m}$ bis $200\ \mu\text{m}$ zu $6,4 \cdot 10^{10}$ Sonnenleuchtkräften bestimmen können. Sie liegt damit unterhalb der für ULIRGs üblichen 10^{12} Sonnenleuchtkräfte. Es scheint aber plausibel, dass die Antennengalaxie sich bei weiterer Verschmelzung zu einer ULIRG entwickeln wird. Damit eignet sie sich aufgrund ihrer Nähe ausgezeichnet für Detailuntersuchungen dieser Galaxienklasse.

Astronomen des Instituts und Kollegen aus Großbritannien und den USA gelang es, dieses kollidierende Galaxienpaar mit bislang unerreichter Trennschärfe mit ISOPHOT bei $60\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ sowie mit dem Instrument SCUBA am James-Clerk-Maxwell-Teleskop bei $450\ \mu\text{m}$ und $850\ \mu\text{m}$ zu beobachten.

Die Bilder im Submillimeterbereich zeigen aufgrund des relativ zur Beobachtungswellenlänge größeren Teleskopdurchmessers mehr Details als die Infrarotbilder (Abb. II.14). Am auffälligsten sind die Kondensationen K1 und K2 (Abb. II.14 a, b), die sich genau in der Kollisionszone der beiden Galaxien befinden. Sie sind etwa 6500 Lichtjahre (Lj) voneinander entfernt und enthalten jeweils um die 10^7 Sonnenmassen an Staub. Das entspricht

etwa 20 % des Staubgehalts einer normalen Spiralgalaxie, der hier auf ein verhältnismäßig kleines Volumen mit weniger als 2000 Lj Durchmesser zusammengepresst ist. Die Kerne der beiden Galaxien ließen sich ebenfalls nachweisen, spielen aber eine untergeordnete Rolle.

Die größte Überraschung bereitete der Unterschied zwischen den beiden Kondensationen K1 und K2: Während sie bei $850\ \mu\text{m}$ etwa gleich hell sind, ist der nördliche Knoten K2 bei $450\ \mu\text{m}$ deutlich schwächer, ist also viel kälter als der südliche Knoten K1. Dies legt die Vermutung nahe, dass in der Region K1 Starbursts den meisten Staub bereits aufgeheizt haben, dagegen in K2 noch nicht.

Vergleiche mit Beobachtungen in anderen Wellenlängenbereichen zeigen in der Tat, dass die beiden Knoten auch im mittleren Infrarot bei $15\ \mu\text{m}$ sowie in der Emission des CO-Moleküls und im Radiobereich bei $6\ \text{cm}$ und $20\ \text{cm}$ Wellenlänge nachgewiesen wurden, während der kalte Knoten K2 deutlich schwächere Hinweise auf heftige Starbursts zeigt als der warme Knoten K1.

Die Untersuchungen zeigen, dass neben den Starbursts mit bereits aufgewärmten Staubregionen auch kalte Gebiete in einer Proto-Starburst-Phase existieren, die sich bald zur Geburtsstätte vieler neuer Sterne entwickeln werden. Dann könnte sich die gesamte Infrarotleuchtkraft so stark erhöhen, dass die Antennengalaxie zur ULIRG wird.

II.3 Schwarze Löcher in Galaxienzentren

Die Bildung massereicher Schwarzer Löcher in den Zentren von Galaxien scheint ein integraler Teil der Entwicklung dieser Sternsysteme zu sein. Dies trifft offenbar nicht nur auf Galaxien mit aktiven Kernen, sondern auch auf normale Galaxien wie unser Milchstraßensystem zu. Astronomen des MPIA gelang es gemeinsam mit Kollegen aus den USA, in fünf schwach aktiven Spiralgalaxien Schwarze Löcher mit einigen zehn bis hundert Millionen Sonnenmassen ausfindig zu machen. Diese neuen Messungen zeigen deutlicher als zuvor eine Beziehung zwischen der Masse eines Schwarzen Loches und dem millionenfach größeren, umgebenden Sternsystem auf. Diese Korrelation muss eine Folge der Entwicklung der Galaxien sein. Ihre Ursache ist indes noch nicht geklärt.

Die Massen Schwarzer Löcher in den Zentren der Galaxien betragen zwischen etwa einer Million und einer Milliarde Sonnenmassen. Sie finden sich sowohl in elliptischen als auch in Spiralgalaxien. In Letzteren allerdings nur dann, wenn diese eine zentrale Verdickung (englisch: Bulge) aufweisen. Der Bulge ist ein nahezu sphärischer Bereich mit überwiegend alten Sternen. Er ähnelt in Form und Farbe einer kleinen elliptischen Galaxie. 1995 fanden amerikanische Forscher, dass die Masse der Schwarzen Löcher proportional zur absoluten Leuchtkraft des umgebenden Bulge anwächst. Weil die Leuchtkraft ein Maß für die in Form von Sternen vorhandene Materie ist, wächst also die Masse eines Schwarzen Loches mit der des Bulges an. Demnach enthalten die Schwarzen Löcher stets etwa 0.2 % der Masse des umgebenden zentralen Bereichs (Abb. II.15a). Diese Korrelation weist allerdings eine sehr große Streuung auf: Bei gegebener Leuchtkraft können die Massen der Schwarzen Löcher bis um einen Faktor tausend differieren.

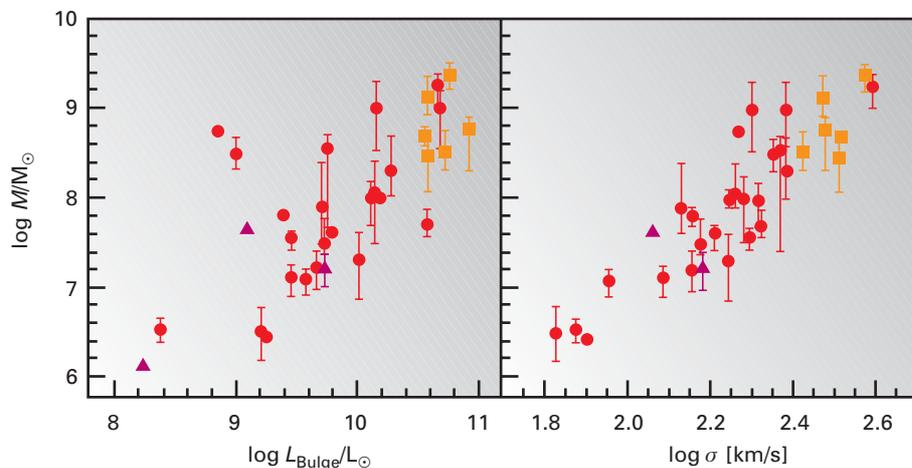
Ein anderes Astronomenteam fand kürzlich bei der Untersuchung von 30 Galaxien einen wesentlich engeren Zusammenhang zwischen der Masse der Schwarzen Löcher und der Geschwindigkeitsdispersion der Sterne im Kernbereich: Je massereicher das Schwarze Loch ist, desto schneller bewegen sich die Sterne im Bulge (Abb. II.15b).

Diese auf den ersten Blick einleuchtend erscheinenden Zusammenhänge erweisen sich bei genauerer Betrachtung als äußerst überraschend: Wenn die Schwarzen Löcher nur etwa 0.2 % der im Bulge vereinigten Masse aufweisen, ist dementsprechend auch ihre Schwerkraft wesentlich geringer als die aller Sterne im Bulge. In Folge dessen sind die Schwarzen Löcher gar nicht in der Lage, die Bewegung der Mehrzahl der Sterne im Kern zu beeinflussen: Die meisten Sterne spüren das zentrale Schwarze Loch gar nicht. Insofern ist die jüngst gefundene Korrelation zwischen der Masse der Schwarzen Löcher und der Geschwindigkeitsdispersion im Bulge keineswegs zwingend. Sie muss mit der Entwicklung oder sogar der Entstehung von Galaxien ursächlich zusammenhängen.

Schwarze Löcher in vier schwach aktiven Spiralgalaxien

Um diesen neuen Befunden weiter auf den Grund zu gehen und die Datenbasis zu erweitern, initiierten Astronomen des Instituts mit Kollegen aus den USA den »Survey of Nearby Nuclei« mit dem Weltraumteleskop

Abb. II.15: Die erst kürzlich entdeckten Korrelationen (a) zwischen den Massen zentraler Schwarzer Löcher und der Leuchtkraft sowie (b) zwischen den Massen und der Geschwindigkeitsdispersion in den sie umgebenden Zentralgebieten (Bulges).



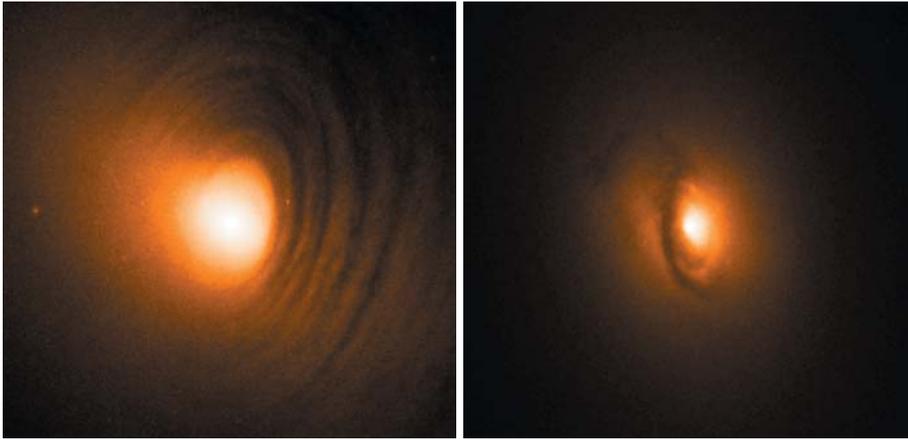
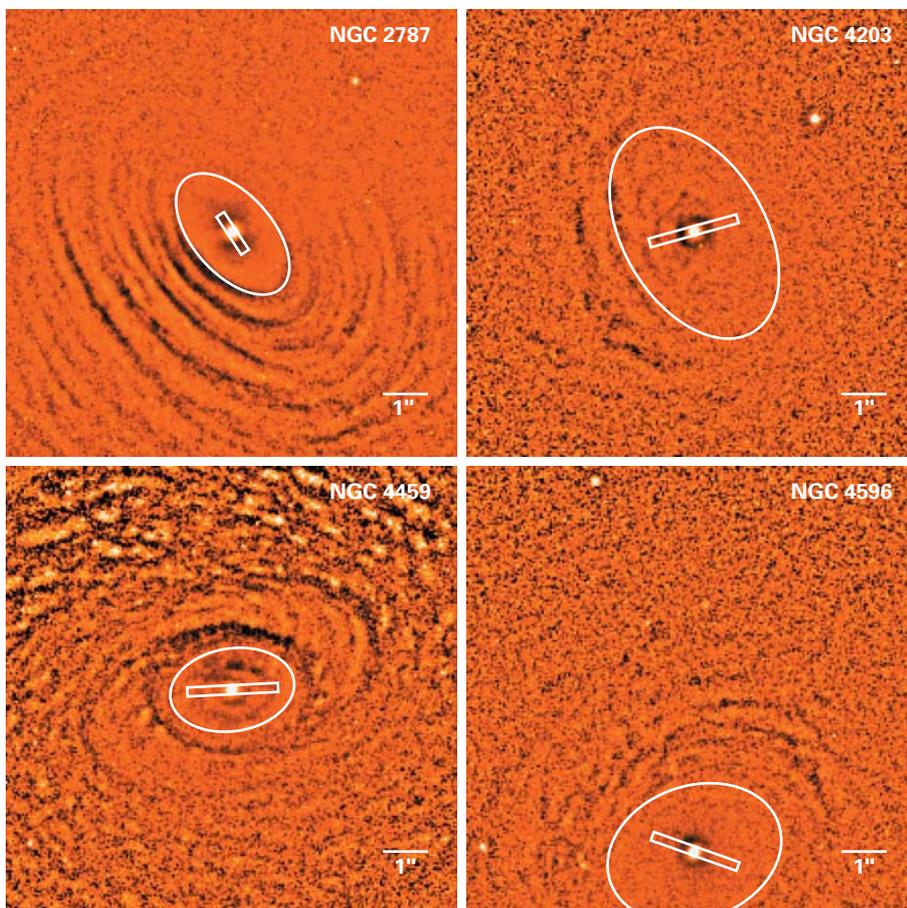


Abb. II.16: Aufnahmen der Zentralbereiche der Galaxien NGC 2787 und NGC 3245 mit dem HST. In den Zentralbereichen sind dünne Staubstreifen erkennbar, die vermutlich die Neigung der inneren Gasscheiben anzeigen.

nutzten hierfür HUBBLES Spektrographen STIS, der über einen langen, schmalen Spalt verfügt. Platziert man ihn so, dass er das Zentrum der Galaxie überdeckt, so lässt sich aus der Doppler-Verschiebung der Spektrallinien die Geschwindigkeit des interstellaren Gases mit wachsendem

HUBBLE. Das Ziel war, möglichst viele Spiralgalaxien, die als schwach aktiv eingestuft werden, spektroskopisch zu untersuchen und die Massen mutmaßlicher Schwarzer Löcher in ihren Zentren zu bestimmen. Die Astronomen

Abb. II.17: Die vier beobachteten Galaxien mit den aus den Modellen konstruierten ellipsenförmigen Scheiben und den Positionen des Spektrographenspalts.



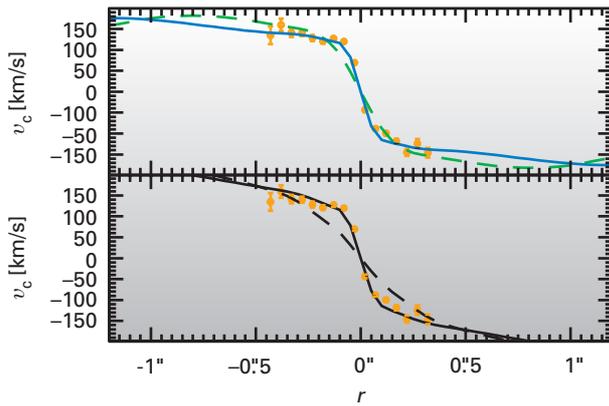
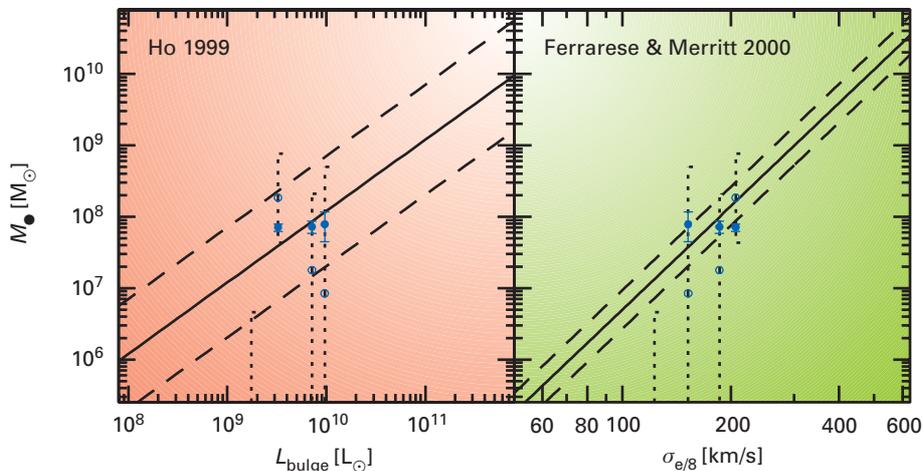


Abb. II.18: Rotationskurve der Gasscheibe in NGC 2787. Oben das Modell mit freier Neigung der Scheibe, unten mit der Scheibenneigung, die aus der Form des Staubsrings abgeleitet wurde.

Abstand vom Zentrum ermitteln. Aus ihr ergibt sich dann die Masse innerhalb des jeweils betrachteten Radius. Voraussetzung für das Gelingen dieser Methode ist, dass sich das Gas möglichst ungestört von äußeren Einflüssen im Schwerkraftfeld bewegt.

Bei zwölf Objekten ließen sich Emissionslinien mit ausreichender Intensität nachweisen. Allerdings schieden acht von ihnen für die Untersuchung aus, weil die Linien bezüglich des Zentrums starke Asymmetrien zeigten. Dies lässt darauf schließen, dass das Gas in seiner Bewegung oft gestört ist und sich nicht auf idealen Kreisbahnen bewegt. Übrig blieben die vier Galaxien NGC 2787 (Entfernung 42 Mio. Lj, Abb. II.16a), NGC 4203 (32 Mio. Lj), NGC 4459 und NGC 4596 (jeweils 55 Mio. Lj). Bei diesen Entfernungen lag die räumliche Auflösung des Spektrographen zwischen 8 und 14 Lj.

Abb. II.19: Die Werte für die Massen der Schwarzen Löcher, aufgetragen gegen die Gesamtleuchtkraft bzw. die Geschwindigkeitsdispersion im Bulge. Sie bestätigen innerhalb des 1- σ -Bereichs (gestrichelte Linien) die lineare Korrelation.



Aus den Spektralverschiebungen der Emissionslinien wurden zunächst die Radialgeschwindigkeiten des Gases abgeleitet. Dann wurde ein Modell erstellt, in dem sich das Gas unter dem Einfluss der Schwerkraft sowohl der Sterne im zentralen Bulge als auch des Schwarzen Lochs bewegt. Hierzu war aus der Verteilung der Leuchtkraft die Massenverteilung der Sterne abzuleiten, wobei ein konstantes Verhältnis von Leuchtkraft zu Masse angenommen wurde. Dabei ergab sich für die Massenverteilung im Zentrum eine punktförmige Spitze. Sie geht vermutlich auf eine Gasscheibe zurück, die das Schwarze Loch umgibt und nicht-thermische Strahlung emittiert. Da sie nicht zum allgemeinen Gravitationsfeld der Sterne beiträgt, wurde sie für die weiteren Modellrechnungen abgezogen.

Um nun aus dem Geschwindigkeitsfeld des Gases in der Scheibe die zentrale Masse berechnen zu können, muss die Neigung der Scheibe gegen die Sichtlinie bekannt sein. Im interessanten Zentralgebiet ist diese jedoch nicht mehr unmittelbar erkennbar. Allerdings finden sich auf Bildern des Weltraumteleskops HUBBLE dünne, ovale Staubstreifen (Abb. II.17).

Die mit Hilfe der beiden Modelle erhaltenen Geschwindigkeitsprofile der Scheibe zeigt exemplarisch Abb. II.18 für NGC 2787. Man erkennt, dass das über den Staubstreifen definierte Modell (unten) die Beobachtungen besser wiedergibt als das freie (oben). Die aus den Modellen abgeleiteten Massen für die vermuteten Schwarzen Löcher betragen etwa $5 \cdot 10^7$ Sonnenmassen für NGC 4203 und jeweils $7 \cdot 10^7$ Sonnenmassen für die drei anderen Galaxien, wobei der Wert für NGC 4203 unsicher ist.

Diese Werte konnten nun genutzt werden, um die kürzlich gefundenen Korrelationen zwischen den Massen der Schwarzen Löcher und den Gesamtmassen im Bulge bzw. der Geschwindigkeitsdispersion zu überprüfen. Es zeigte sich, dass die neuen Beobachtungen die Korrelation im Rahmen der Unsicherheiten bestätigen (Abb. II.19). Dies ist auch deswegen bemerkenswert, weil diese bislang fast ausschließlich für Elliptische Galaxien untersucht werden konnte. Dass nun auch drei Spiralgalaxien diesen Zusammenhang aufweisen, hat für die Interpretation im Rahmen

eines Modells für die Galaxienentwicklung große Bedeutung. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Streuung der Messwerte um einen Faktor zwei geringer ist als bislang angenommen.

Das Schwarze Loch in der S0-Galaxie NGC 3245

Besonders detailliert studierte das Team die 65 Mio. Lj entfernte S0-Galaxie NGC 3245 (Abb. II.16). Sie zeigt im Zentralbereich leichte Aktivität und eine nicht auflösbare Radioquelle. Zudem hatten spektroskopische Beobachtungen auf hohe Rotationsgeschwindigkeiten nahe dem Zentrum hingedeutet. Mit dem Weltraumteleskop HUBBLE wurden Direktaufnahmen durch unterschiedliche Filter sowie mehrere Spektren gewonnen (Abb. II.20). Die zentrale Scheibe hat eine Ausdehnung von lediglich 1.1 mal 0.4 Bogensekunden, woraus sich ein Radius von 360 Lj ergibt.

Um den gravitativen Beitrag des nicht sichtbaren mutmaßlichen Schwarzen Lochs zu bestimmen, wurde zunächst die Masse der Sterne und der Scheibe im Zentralgebiet ermittelt. Für die Scheibe ergab sich ein Wert von $2.4 \cdot 10^6$ Sonnenmassen. Der ist so gering, dass er bei der späteren Modellierung der Dynamik vernachlässigbar war.

Die Spektren mit den Emissionslinien von Wasserstoff und Stickstoff zeigt Abb. II.21. Hiervon wurde das Sternlicht abgezogen und die Linien dann mit einem Modell angepasst. Schließlich wurden die Modellpara-

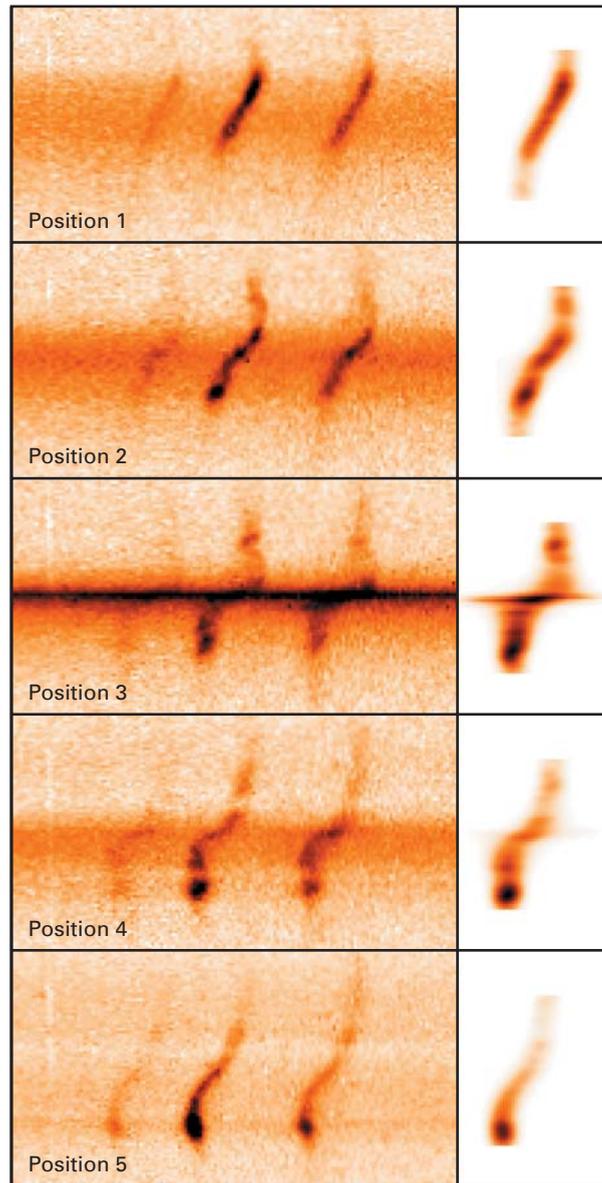


Abb. II.21: Die Spektren mit den Emissionslinien von Wasserstoff und Stickstoff. Rechts ein Best-Fit-Modell der Linien.

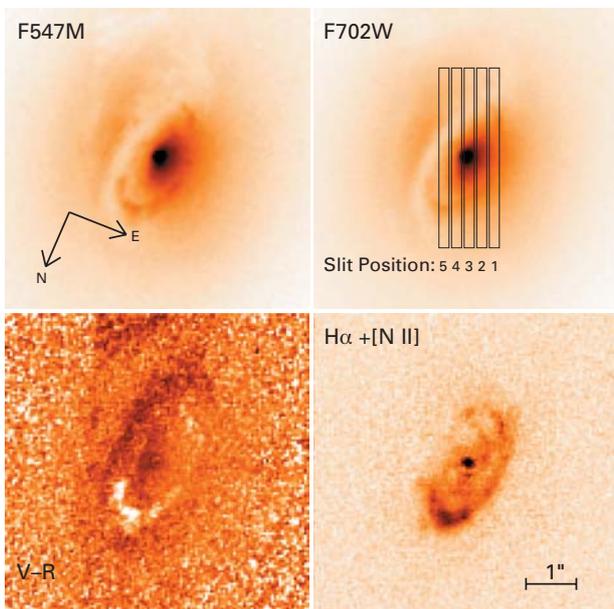
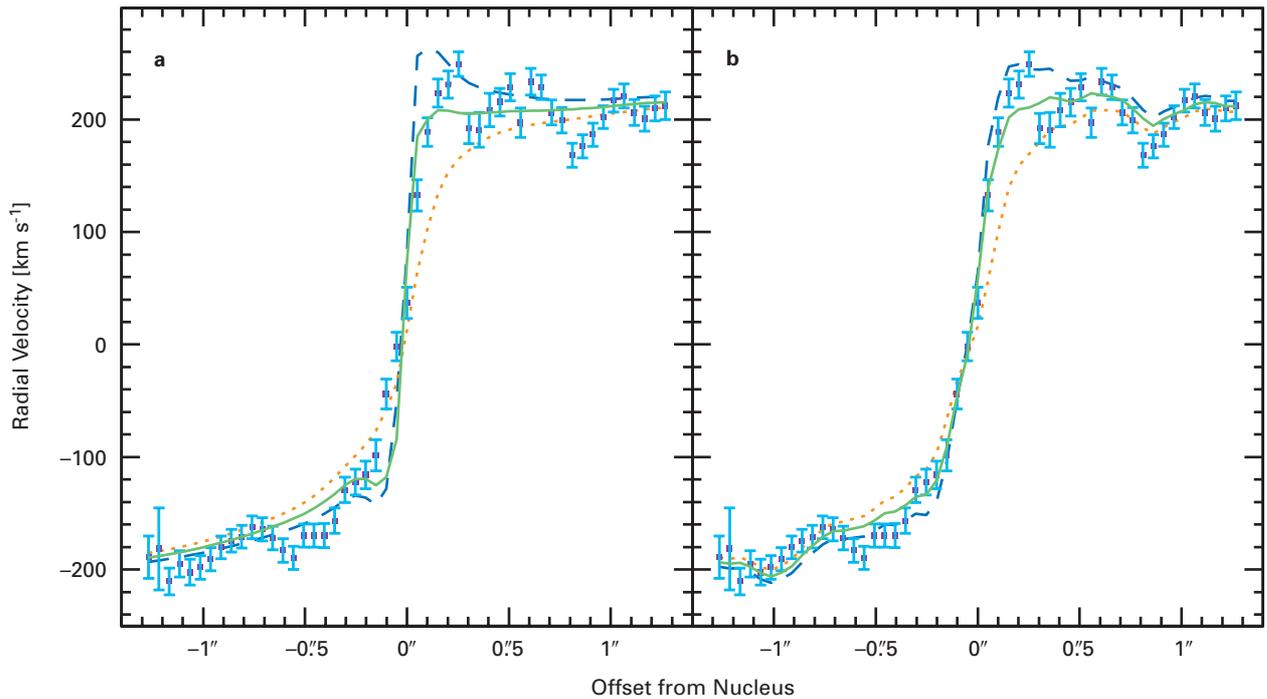


Abb. II.20: NGC 3245 im blauen und roten Licht (oben) sowie im Bereich der Emissionslinien von Wasserstoff und Stickstoff (unten rechts). Die Differenz aus dem sichtbaren und dem roten Licht (unten links) zeigt Bereiche unterschiedlicher Extinktion an. Rechts oben sind die Positionen des Spektrographenspalts eingezeichnet.

meter, wie das Verhältnis Masse/Leuchtkraft, das Gasdichteprofil in der Scheibe und die Neigung der Scheibe, so lange variiert, bis das Modell die beobachteten Linien und die Geschwindigkeiten am besten wiedergab. Besondere Sorgfalt wurde darauf verwandt, instrumentelle Effekte, wie eine Verbreiterung der Emissionslinien oder die Überlagerung von Licht aus unterschiedlichen, innerhalb des Spektrographenspalts liegenden Bereichen der Scheibe, mit zu berücksichtigen.

Hierbei zeigte es sich, dass sich die Linien mit wachsender Annäherung ans Zentrum stark verbreiterten. Dieses Phänomen könnte von Gaswolken hervorgerufen werden, die entweder stark turbulent sind oder sich auf ellipsenförmigen Bahnen um das Zentrum bewegen. Ohne die wirkliche Ursache für die Linienverbreiterung zu ken-



nen, wurden zwei Modelle aufgestellt, von denen das eine diesen Effekt berücksichtigte, das andere nicht. Hiermit ließen sich dann die Rotationskurve des Gases in der Scheibe und die Masse im zentralen, räumlich nicht auflösbaren Gebiet berechnen (Abb. II.22). Als Mittelwert aus allen Simulationen ergab sich ein Wert von $2.1 \cdot 10^8$ Sonnenmassen mit einer Unsicherheit von etwa 25 %. Es zeigte sich, dass diese große Sorgfalt in der Modellierung nötig war, um diese Präzision der Massenbestimmung zu erzielen.

Dass es sich tatsächlich um ein Schwarzes Loch handelt, lässt sich daraus noch nicht unzweifelhaft schließen. Es gibt aber im Grunde keine physikalisch vernünftigen Alternativen dazu. Alle Modelle mit einem zentralen, dichten Haufen dunkler Körper liefern Rotationskurven, die im Zentralbereich flacher verlaufen als beobachtet. Rein statistisch ließen sich Modelle ohne einen zentralen massereichen Körper mit einer Sicherheit von 99.99 % ausschließen.

NGC 3245 besitzt im inneren Bereich eine Geschwindigkeitsdispersion von 230 km/s. Daraus lässt sich aus der Eingangs beschriebenen Korrelation (Abb. II.19) die Masse des Schwarzen Lochs zu $(2.0 - 2.5) \cdot 10^8$ Sonnenmassen vorhersagen. Dieser Wert stimmt hervorragend mit dem in dieser Studie ermittelten Wert überein. Demnach erfüllt also auch NGC 3245 die genannte Korrelation zwischen der Masse des Schwarzen Lochs und der Geschwindigkeitsdispersion.

Abb. II.22: Messwerte und Rotationskurven von zwei Modell-simulationen. Gepunktete Linie: ohne Schwarzes Loch, durchgezogene Linie: Schwarzes Loch mit $2 \cdot 10^8$ Sonnenmassen, gestrichelt: mit $4 \cdot 10^8$ Sonnenmassen.

Bislang ist unklar, wodurch der Zusammenhang zwischen der Masse des zentralen Schwarzen Loches und den Eigenschaften des umgebenden Bulge zustande kommt. Theoretiker vom MPI für Astrophysik in Garching sehen darin eine Bestätigung für das Modell der hierarchischen Galaxienentwicklung. Hiernach sind die heute beobachtbaren großen Galaxien dadurch entstanden, dass im frühen Universum kleine Galaxien miteinander verschmolzen sind. Diese „Bausteingalaxien“ enthielten bereits masseärmeren Schwarze Löcher, die sich zu einem massereichen Schwarzen Loch vereinigten. Computersimulationen sagen für diese Hypothese tatsächlich einen Zusammenhang zwischen der Masse des zentralen Schwarzen Lochs und der Geschwindigkeitsdispersion im Bulge voraus. Das selbe gilt allerdings auch für Modelle, in denen die gleichzeitige Entstehung des Bulges und eines zentralen Schwarzen Lochs aus einer anfänglichen großen Wolke angenommen wird. Nur mit Hilfe weiterer Beobachtungen wird es möglich sein, diese fundamentalen Vorgänge in der Entstehung und Entwicklung der Galaxien aufzuklären.

III Instrumentelle Entwicklungen

Die Leistungsfähigkeit eines Teleskops hängt entscheidend von der Qualität und Effizienz des Messinstruments ab, das in seiner Brennebene angebracht ist. Kameras erzeugen möglichst scharfe Bilder der Himmelskörper und Spektrographen zerlegen das Licht möglichst fein in seine spektralen Komponenten. Am MPIA wurden in den vergangenen Jahren eine ganze Reihe wissenschaftlicher Instrumente entwickelt und gebaut, mit denen sich die Effizienz der Teleskope deutliche verbessern und deren Einsatzgebiete erheblich erweitern ließ. Zur Zeit entstehen mehrere Instrumente, die am Calar-Alto-Observatorium, am Very Large Telescope der ESO und an dem im Bau befindlichen Infrarot-Weltraumteleskop HERSCHEL der ESA arbeiten werden.

Die Instrumente werden in den Werkstätten des MPIA, häufig in Zusammenarbeit mit kleinen und großen Firmen, gebaut. Die von den Wissenschaftlern gestellten Anforderungen konfrontieren diese Unternehmen nicht selten mit völlig neuen Aufgaben. Das hierbei erarbeitete Know-how stärkt deren Wettbewerbsfähigkeit auf dem Weltmarkt. Von entscheidender Bedeutung ist auch der Einsatz von Charge Coupled Devices (CCD) – lichtempfindlichen Halbleitern, die je nach Wellenlänge zwischen 60 und nahezu 100 % Quantenausbeute erzielen. Am Teleskop können keine handelsüblichen CCDs eingesetzt werden. Nur die qualitativ hochwertigsten Chips eignen sich für die Astronomie. Sie werden von Firmen produziert, müssen aber in den Laboratorien des MPIA ausführlich auf ihre Tauglichkeit getestet werden, bevor sie an einem der Teleskope zum Einsatz kommen.

Es folgt eine Übersicht über die neueren Instrumente des MPIA und den aktuellen Stand im Berichtsjahr.

ALFA – Adaptive Optik für den Calar Alto

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 Bogensekunde beträgt. Großteleskope erreichen daher keine bessere Auflösung als Fernrohre mit 15 bis 30 Zentimeter großen Spiegeln.

Astronomen und Ingenieure vom MPIA haben in Zusammenarbeit mit Kollegen vom MPI für extraterrestrische Physik in Garching (MPE) ein so genanntes adaptiv optisches System für den nahen Infrarotbereich gebaut: ALFA. Damit lassen sich die Bildschwankungen während der Belichtung korrigieren (vgl. Jahresbericht 1997, S. 11). Dies ermöglichen zwei zentrale optische Elemente: 1) ein Wellenfrontsensor, der das Licht eines Sterns analysiert und die Verzerrung der Lichtwelle feststellt; 2) ein sehr dünner und flexibler Spiegel, auf den das Licht trifft und von dort in die Kamera reflektiert wird. An der Spiegerrückseite befinden sich knapp hundert kleine Stillelemente, die seine Oberfläche ständig verformen. Ein Computer berechnet aus den Daten des Wellenfrontsensors die optimale aktuelle Spiegelform. Sie ist genau so gewählt, dass die von der Luftunruhe deformierten Lichtzüge nach der Reflexion am adaptiven Spiegel wieder »glatt« sind. Erst dann fällt das Licht in die Kamera, wo ein Bild nahezu mit der theoretisch möglichen Auflösung entsteht. Im Wellenlängenbereich von 1 μm bis 2.5 μm , in dem ALFA arbeitet, ist eine Korrekturfrequenz von mindestens 100 Hz nötig.

Damit der Wellenfrontsensor schnell genug arbeiten kann, benötigt er einen Stern mit einer gewissen Mindesthelligkeit. Deren Wert konnte im Berichtsjahr von 13.5 mag auf 14.2 mag herabgesetzt werden – damit ist ALFA eines der empfindlichsten Systeme dieser Art ist.

Darüber hinaus wurde ein weiteres Experiment aufgebaut, mit dem sich auf längere Sicht Beobachtungen mittels adaptiv optischer Systeme optimieren lassen, das SCIDAR (Scintillation Detection and Ranging).

Mit adaptiv optischen Systemen können Bildverzerrungen, verursacht durch die atmosphärische Turbulenz, nur zum Teil kompensiert werden. Davon sind vor allem Objekte außerhalb der zentralen Korrekturachse 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 wird ein Doppelstern unscharf abgebildet (genauer ist es eine Abbildung in der Pupillenebene). Aus

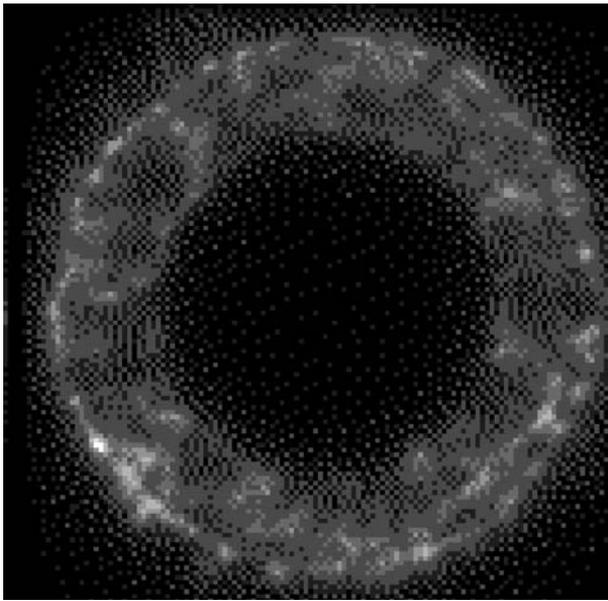


Abb. III.1: Pupillenbild des 1.23-Meter-Teleskops mit SCIDAR. Sichtbar sind die Intensitätsschwankungen, die durch Beugungseffekte in den turbulenten Schichten hervorgerufen werden. (Belichtungszeit 1.3 ms)

der Intensitätsmessung des Pupillenbilds der beiden Sterne lässt sich die vertikale Turbulenzstruktur in der Atmosphäre bis in etwa zwanzig Kilometer Höhe ermitteln. Während aus Messungen der Phasenverzerrungen über 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 enthalten sie Informationen über die Höhenverteilung der Turbulenz.

Ende 2000 wurde das SCIDAR-Instrument des Imperial College in London am 1.23-Meter-Teleskop auf dem Carlo Alto erstmals synchron zu ALFA-Beobachtungen am 3.5-Meter-Teleskop eingesetzt. Im Wesentlichen handelt es sich um eine Kamera mit Lichtverstärker und einem empfindlichen Detektor. Die eigentliche Arbeit beginnt bei der Datenauswertung. Der erste Test (Abb. III.1) verlief bereits erfolgreich. Im Sommer 2001 sollen weitere Beobachtungen folgen. Bewährt sich die SCIDAR-Technik, so ließe sie sich später beispielsweise am adaptiv optischen System des VLT einsetzen. Hier könnte das Instrument an einem der kleineren Hilfsteleskope als eine Art »erweiterter Wetterstation« arbeiten, während die adaptive Optik an den Großteleskopen läuft.

ALFA – Astronomische Leistungsfähigkeit

Mit ALFA erzielten die Astronomen des Instituts gemeinsam mit Kollegen anderer Forschungseinrichtungen eine Reihe brillanter Beobachtungserfolge. So konnten sie zusammen mit Astronomen des MPE das Sternsystem

T Tauri im nahen Infrarot mit einer Auflösung um $0''.15$ spektroskopieren.

T Tauri ist der Namensgeber für alle jungen Sterne mit etwa einer Sonnenmasse und einem maximalen Alter von einer Million Jahren. Im Laufe der letzten zwanzig Jahre hat sich dieser Prototyp als wesentlich komplexer erwiesen als anfangs vermutet. So weiß man heute, dass es sich um mindestens drei, vielleicht sogar vier Sterne handelt. Nur die Hauptkomponente im Norden (T Tau N) ist im visuellen Spektralbereich sichtbar. Der $0''.7$ südlich von ihr gelegene Sterne T Tau S lässt sich nur im Infraroten nachweisen. Erst 1998 fand man, ebenfalls im Infraroten, in nur $0''.05$ Abstand einen Begleiter von T Tau S.

Das T-Tauri-System ist eine Quelle vielfältiger Aktivität. So hatten Astronomen des Instituts bereits in den achtziger Jahren eine schnelle Gasströmung in östlicher Richtung gefunden. 1997 konnten MPIA-Forscher erstmals zeigen, dass bei dieser Strömung Magnetfelder eine wesentliche Rolle spielen (s. Jahresbericht 1997, S. 48).

Für ihre jüngsten Beobachtungen setzten die Astronomen ein am MPE gebautes Instrument ein, das es ermöglicht, ein Feld von einer Bogensekunde Kantenlänge komplett (zweidimensional) zu spektroskopieren. Am 3.5-Meter-Teleskop des Calar Alto wurde das T-Tauri-System um Wellenlängen von $1.65 \mu\text{m}$ und $2.2 \mu\text{m}$ untersucht (Abb. III.2).

Die Spektren (Abb. III.3) zeigen, dass T Tau S von heißem, dichtem Staub umgeben ist. Gleichzeitig waren bei T Tau S und N Wasserstofflinien erkennbar. Sie entstehen vermutlich in einem Teilchenwind der beiden Sterne. Die hohe Auflösung der Aufnahmen ermöglichte es festzustellen, dass dieser Wind innerhalb von wenigen zehn Astronomischen Einheiten vom Stern einsetzt. Darüber hinaus bestätigen die neuen Beobachtungen ein Modell,

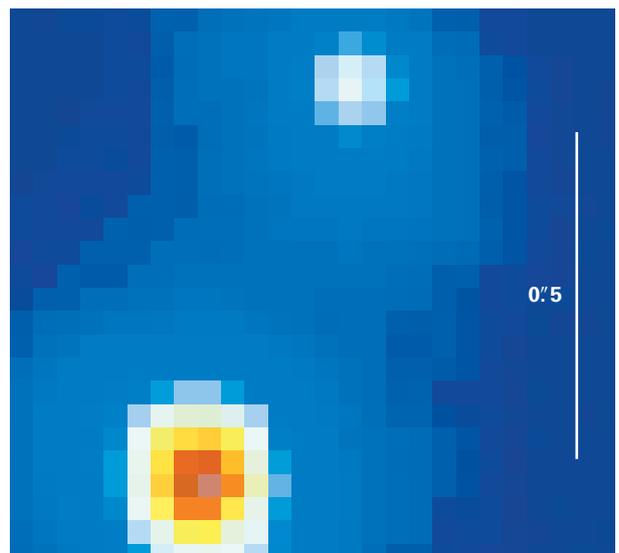


Abb. III.2: Falschfarbendarstellung des T-Tauri-Systems auf dem 3D-Detektor. Jedes Bildelement dieser Abbildung beinhaltet ein komplettes Spektrum im K-Band (um $2.2 \mu\text{m}$). Der Abstand der beiden Komponenten beträgt $0.69''$.

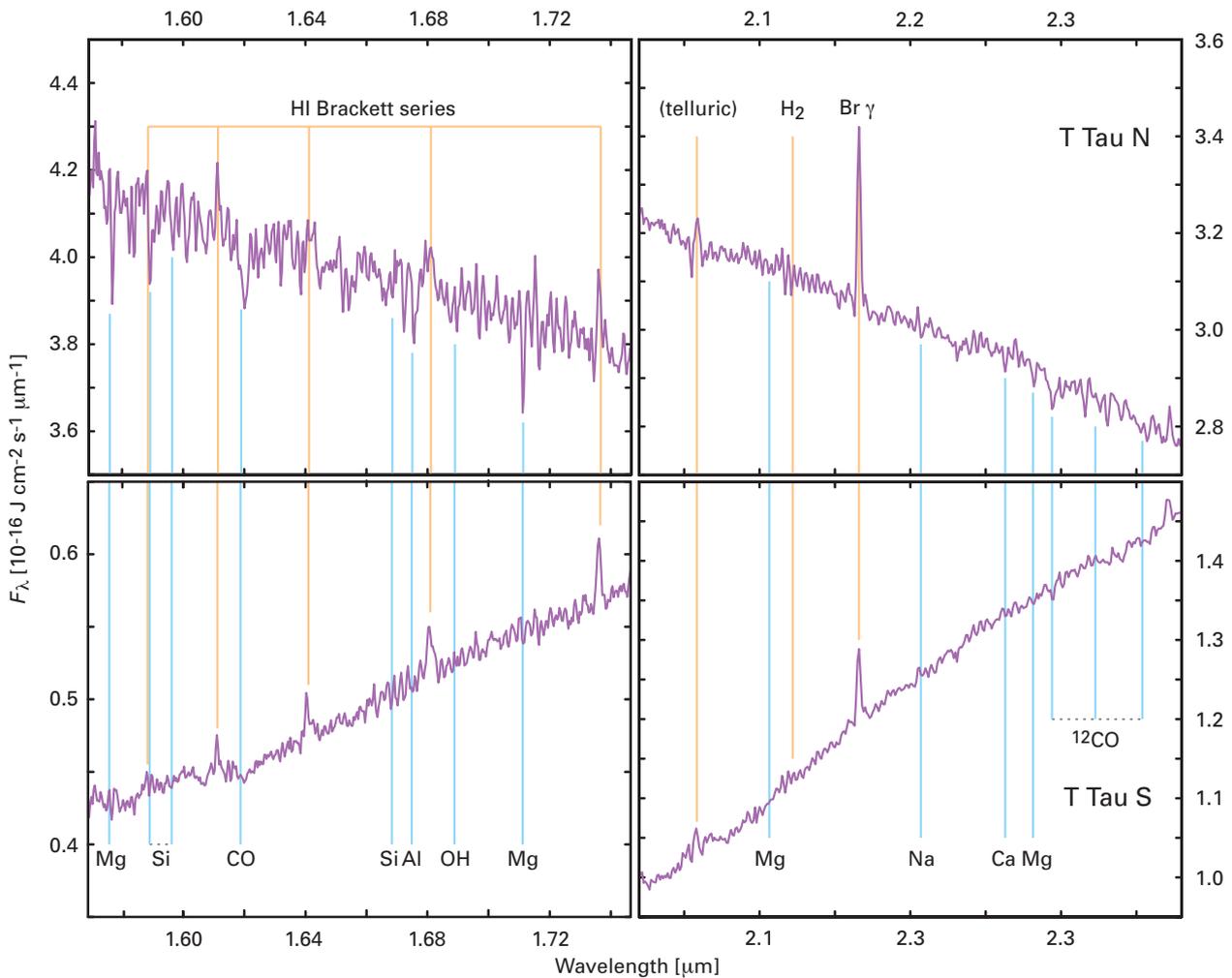


Abb. III.3: Spektren von T Tau Nord und T Tau Süd im H- und im K-Band (1.65 μm und 2.2 μm). Die Spektren wurden aus den zentralen 2 mal 2 Pixeln der stellaren Kerne (siehe Abb. III.1) extrahiert. Deutlich erkennbar sind die unterschiedlichen spektralen Indizes der beiden Komponenten und die völlige Abwesenheit photosphärischer Absorptionslinien in den Spektren von T Tau S, die darauf hindeutet, dass die rote Farbe durch thermische Emission heißen Staubes zustande kommt.

wonach T Tau S und dessen naher Begleiter jeweils von einer dichten Staubscheibe umgeben sind, auf deren Kante wir sehen. Sie absorbieren das sichtbare Licht der beiden Sterne. An den Polen kann es hingegen entweichen und ist dort – wenn auch nicht räumlich aufgelöst – nachweisbar.

Gemeinsam mit Kollegen der Sternwarten Jena und Tautenburg gelang es mit ALFA, zwei Sternentstehungsgebiete erstmals im nahen Infrarot zu untersuchen. Diese Beobachtungen waren Teil eines umfassenden Beobachtungsprogramms, in dessen Rahmen die beiden Gebiete zudem auf La Silla im Infraroten polarimetrisch und bei 1.3 mm Wellenlänge studiert wurden. Hier werden die Ergebnisse der adaptiven Optik kurz skizziert.

Die beiden Objekte mit den Bezeichnungen G11.11-040 (kurz G11) und G341.21-0.21 (G341) sind so genannte ultrakompakte HII-Regionen. Das sind Gebiete, in denen massereiche Sterne entstehen, die um sich herum durch ihre intensive heiße Strahlung das Gas ionisieren. Die beiden Gebiete sind mit etwa 17000 bzw. 12000 Lj Entfernung rund zehnmal weiter entfernt als beispielsweise das Sternentstehungsgebiet im Orionnebel. Aus diesem Grunde sind sie auch wesentlich schwerer beobachtbar. Die Objekte sind so klein, dass sie mit herkömmlichen Methoden nicht auflösbar sind. Bei G11 gelang dies jetzt mit ALFA.

In G11 ließen sich fünf Objekte photometrisch beobachten (Abb. III.4). Es handelt sich um heiße, junge Sterne, die jeweils von einer ultrakompakten HII-Region umgeben sind. Einer erwies sich als O5- und zwei weitere als B1-Hauptreihensterne. Sie befinden sich also bereits im hydrostatischen Gleichgewicht. Die beiden anderen Sterne sind offenbar so jung, dass sie die Hauptreihe noch nicht erreicht haben.

In G341 konnten auf La Silla mit dem adaptiv optischen System ADONIS neun Sterne identifiziert werden, von denen sich zwei als O- und einige andere als B-Haupt-

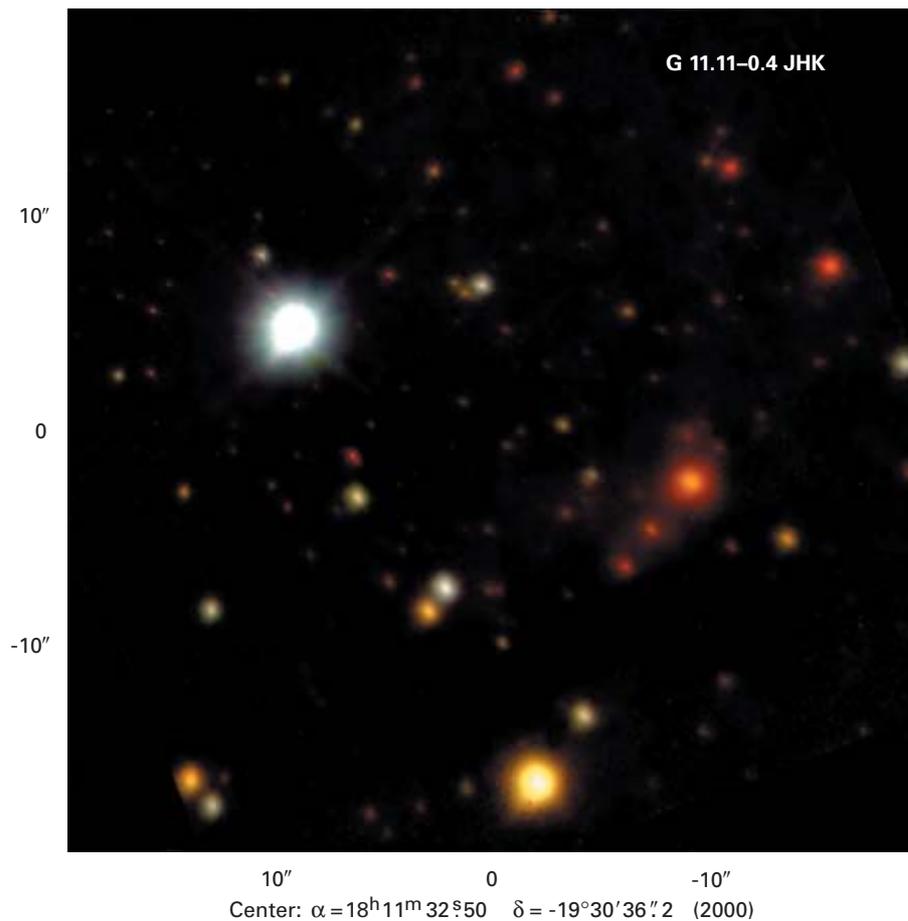


Abb. III.4: Das Sternentstehungsgebiet G11.11-040, aufgenommen mit ALFA. Es wurden drei Aufnahmen, bei 1.25 μm , 1.65 μm und 2.2 μm Wellenlänge, zu einer infraroten »Farbaufnahme« überlagert.

reihensterne erwiesen. Diese Objekte sind über 20-mal so massereich wie die Sonne. Vergleicht man ihre Masse mit der Gesamtmasse des G11-Komplexes von etwa 10000 Sonnenmassen, so zeigt sich, dass hier etwa ein halbes Prozent der interstellaren Materie in Sterne umgewandelt worden ist.

Damit konnte eindrucksvoll belegt werden, dass auch sehr massereiche Sterne nicht isoliert, sondern in kompakten Gruppen entstehen können. Die heißen Sterne sollen zukünftig mit hoher Auflösung spektroskopiert werden. Hierfür eignet sich das adaptiv optische System, das derzeit am Very Large Telescope der ESO entsteht, oder auch das zukünftige europäische Infrarot-Weltraumteleskop HERSCHEL.

ALFA mit Laserleitstern

Sind alle Himmelskörper im Gesichtsfeld für den Wellenfrontsensor zu lichtschwach, so müssen sich die

Astronomen einen »künstlichen Stern« schaffen. Dazu schießen sie parallel zur Blickrichtung des Teleskops einen Laserstrahl zum Himmel. In einer Höhe um 90 Kilometer trifft dieser auf eine mit Natriumatomen angeereicherte Schicht. Die Wellenlänge des Lasers ist so eingestellt, dass er die Natriumatome zum Leuchten anregt. Auf diese Weise entsteht über dem Teleskop ein Lichtfleck, der im Idealfall einem Stern 10. Größe entspricht. Er dient der adaptiven Optik während der Bildkorrektur als heller Vergleichssterne.

Auf dem Calar Alto wurde ein solches System aufgebaut, eingehend getestet und optimiert (s. Jahresbericht 1999, S.31). Dabei wurde demonstriert, dass Beobachtungen mit ALFA und einem Laserleitstern im Prinzip möglich sind. Allerdings hängt die Effizienz, mit der sich der Laserleitstern einsetzen lässt, u.a. von den meteorologischen Bedingungen ab. Auf dem Calar Alto hat sich der für einen sinnvollen Einsatz nötige Aufwand leider als zu hoch erwiesen.

Die gewonnenen Erfahrungen sind deshalb jedoch nicht verloren: Sie werden beim Aufbau eines adaptiv optischen Systems am Very Large Telescope der ESO von großem Nutzen sein. Das MPIA und das MPE werden dort gemeinsam an einem der 8-Meter-Teleskope (YEPUN) einen Natrium-Laser, genannt PARSEC, installieren. Er soll einen kontinuierlichen Strahl mit 10 bis 15 Watt

Leistung produzieren. Der Laserleitstern soll ab 2003 im Zusammenhang mit der ebenfalls am Institut gebauten Kamera CONICA und der adaptiven Optik NAOS die Leistungsfähigkeit des Teleskops erhöhen. Für die fernere Zukunft ist daran gedacht, an einem Teleskop bis zu fünf Laserleitsterne gleichzeitig einzusetzen. Damit ließe sich das korrigierte Bildfeld wesentlich vergrößern.

LAICA – die Weitfeldkamera für den Calar Alto

Für die Zukunft erwartet man wesentliche Erkenntnisse von Forschungsprojekten, bei denen schwache Himmelskörper innerhalb großer Felder gesucht werden. Dieser neuen Entwicklung trägt das Institut verstärkt Rechnung. 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 Berichtsjahr wurde der Bau einer neuen Weitfeld-Infrarotkamera für den Calar Alto, genannt Omega 2000, beschlossen (s.u.).

Kurz vor dem Einsatz steht der Large Area Imager for Calar Alto, kurz LAICA. Diese Kamera wird am 3.5-Meter-Teleskop arbeiten und dort ein nutzbares, fehlerfreies Bildfeld von 44 Bogenminuten (entsprechend 115 mm) Kantenlänge erschließen. In ihrer Brennebene befindet sich ein Mosaik aus vier CCDs mit jeweils 4096 mal 4096

Pixeln. Die Abbildungsskala wird 0"225 pro Pixel sein (s. Jahresbericht 1999, S. 33).

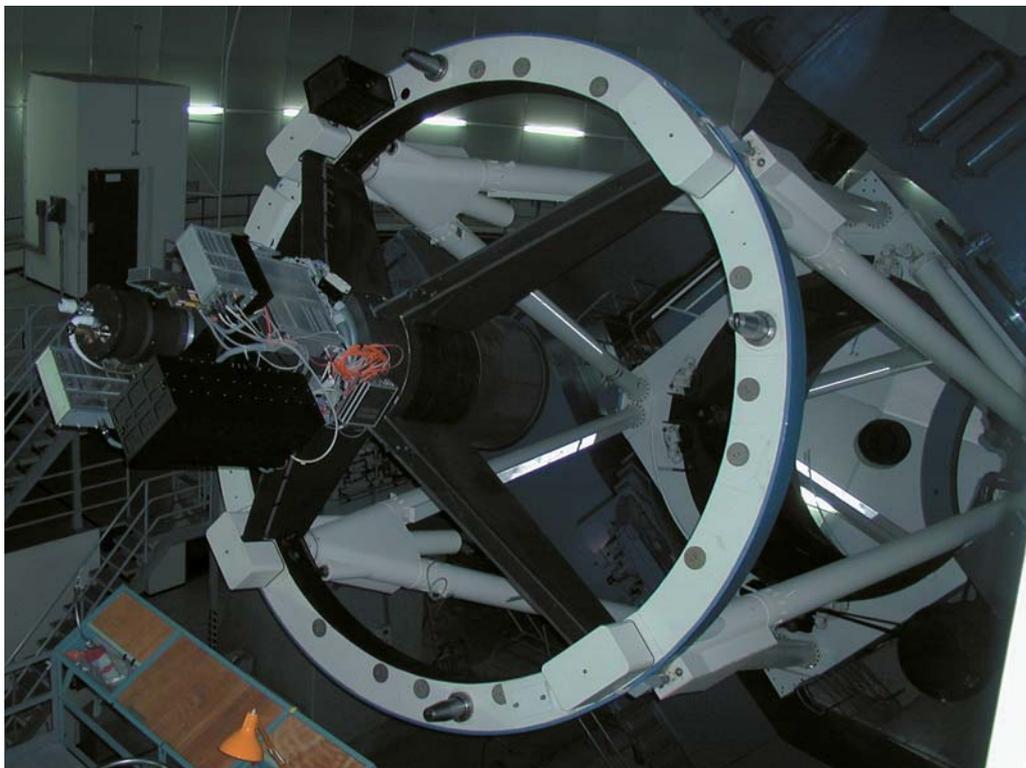
Da die CCDs aus fertigungstechnischen Gründen nicht fugenfrei aneinander stoßen können, bleibt ein etwa 20 mm breiter, kreuzförmiger Spalt frei. Daher lässt sich mit einer einzigen Aufnahme kein geschlossenes Himmelsgebiet aufnehmen. Dies kann aber ohne großen Aufwand ausgeglichen werden, indem man drei weitere Aufnahmen mit unterschiedlicher Positionierung anfertigt. Ein Satz von vier Aufnahmen überdeckt ein zusammenhängendes Feld von einem Quadratgrad, entsprechend etwa fünf Vollmondflächen.

Zudem sind zwei kleinere CCDs integriert, die der Nachführung dienen. Damit lassen sich auch Bild Drehungen, wie sie bei längeren Beobachtungen auftreten können, feststellen und korrigieren. Die Nachführungseinrichtung wurde im Sommer erfolgreich am Teleskop getestet.

Zunächst sind zwei Filtersätze vorgesehen. Das Magazin enthält 20 Filter, die ein Greifarm herausnimmt und in den Strahlengang schiebt.

Mit dem Bau von LAICA wurde Anfang 1999 begonnen. Im Berichtsjahr wurden die Mechanik fertig gestellt und Kältetests erfolgreich durchgeführt. Die Inbetriebnahme verzögerte sich dann jedoch, weil der Hersteller die CCDs nicht rechtzeitig lieferte und ein CCD gebrochen war. Mit Verspätung wurde das gesamte Equipment dann Ende des Jahres zum Calar Alto transportiert und am 20. Mai 2001 sah LAICA erstes Licht (Abb. III.5). Nach weiteren Optimierungen soll die Kamera ab Herbst 2001 regulär am Teleskop arbeiten.

Abb. III.5: LAICA bei Tests im Primärfokus des 3.5-Meter-Teleskops auf dem Calar Alto.



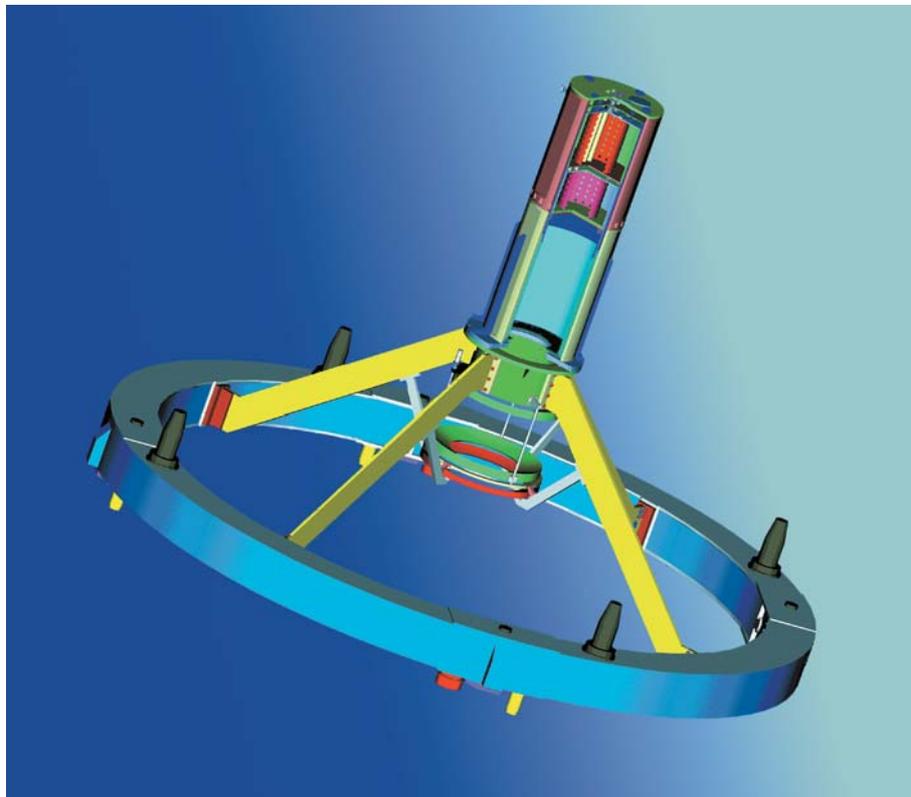
OMEGA 2000 – Weitfeld-Infrarotkamera für den Calar Alto

Das Institut ist in der Infrarotastronomie stark engagiert. Die neueren Instrumente MAGIC sowie OMEGA-Prime und OMEGA-Cass zeugen hiervon. Die Entwicklung neuer Kameras hängt entscheidend von der Verfügbarkeit von Infrarotdetektoren ab. Seit kurzem sind Arrays mit 2048 mal 2048 Pixel erhältlich. Sie sind bis zu einer Wellenlänge von 2.4 μm empfindlich und haben zwischen 0.8 μm und 2.4 μm eine Quantenausbeute von etwa 60 %.

Um die Position des Calar Alto an der vordersten Front der Infrarotastronomie zu erhalten, wurde am MPIA beschlossen, eine neue Kamera für das nahe Infrarot zu entwickeln und zu bauen. Sie wird OMEGA-Prime ähneln, jedoch ein fünfmal größeres Gesichtsfeld mit 15' mal 15' aufweisen (Abb. III.6). 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.

Durch das große Gesichtsfeld und die angestrebte schnelle Ausleserate der Infrarotdetektoren wird eine hohe Datenrate von etwa 100 GB pro Nacht anfallen. Die Verarbeitung dieser Datenmenge wird das Computernetz

Abb. III.6: OMEGA 2000 am Frontring des 3.5-Meter-Teleskops. (Konstruktionszeichnung)



auf dem Calar Alto bis an seine Grenzen treiben und die neuesten Verarbeitungstechniken sowie eine deutlich größere Datenspeicherkapazität als bislang erfordern.

Wenn alles nach Plan verläuft, wird OMEGA 2000 im Jahr 2002 in den regulären Betrieb gehen und dann das bisherige Arbeitspferd OMEGA-Prime ablösen.

CONICA – Hochauflösende Infrarotkamera für das VLT

CONICA ist eine hochauflösende Kamera für das Infrarot. Sie entsteht derzeit unter der Federführung des MPIA in Zusammenarbeit mit dem MPE. Sie wird am Nasmyth-Fokus des dritten der vier in Betrieb genommenen Teleskope des Very Large Telescope der ESO arbeiten. Zusammen mit dem adaptiv optischen System NAOS soll CONICA im nahen Infrarot von 1 μm bis 5 μm beugungsbegrenzte Bilder mit einer Auflösung bis herab zu 0.026 Bogensekunden liefern.

Als Detektor dient ein Infrarot-Array mit 1024 mal 1024 Pixel. Der Abbildungsmaßstab wird zwischen 0.014 und 0.11 Bogensekunden pro Bildelement wählbar sein. Für jede dieser Skalen sind zwei Kamerasysteme vorhanden, die in den Wellenlängenbereichen von 1 μm bis 2.5 μm und von 2 μm bis 5 μm arbeiten. Das Bildfeld besitzt je nach gewählter Variante eine Ausdehnung zwischen 14" mal 14" und 56" mal 56" und bei geringster Auflösung 73" Durchmesser.

CONICA ist ein multifunktionales Instrument mit einem Fabry-Pérot-Interferometer (Wellenlängenbereich: 2 μm

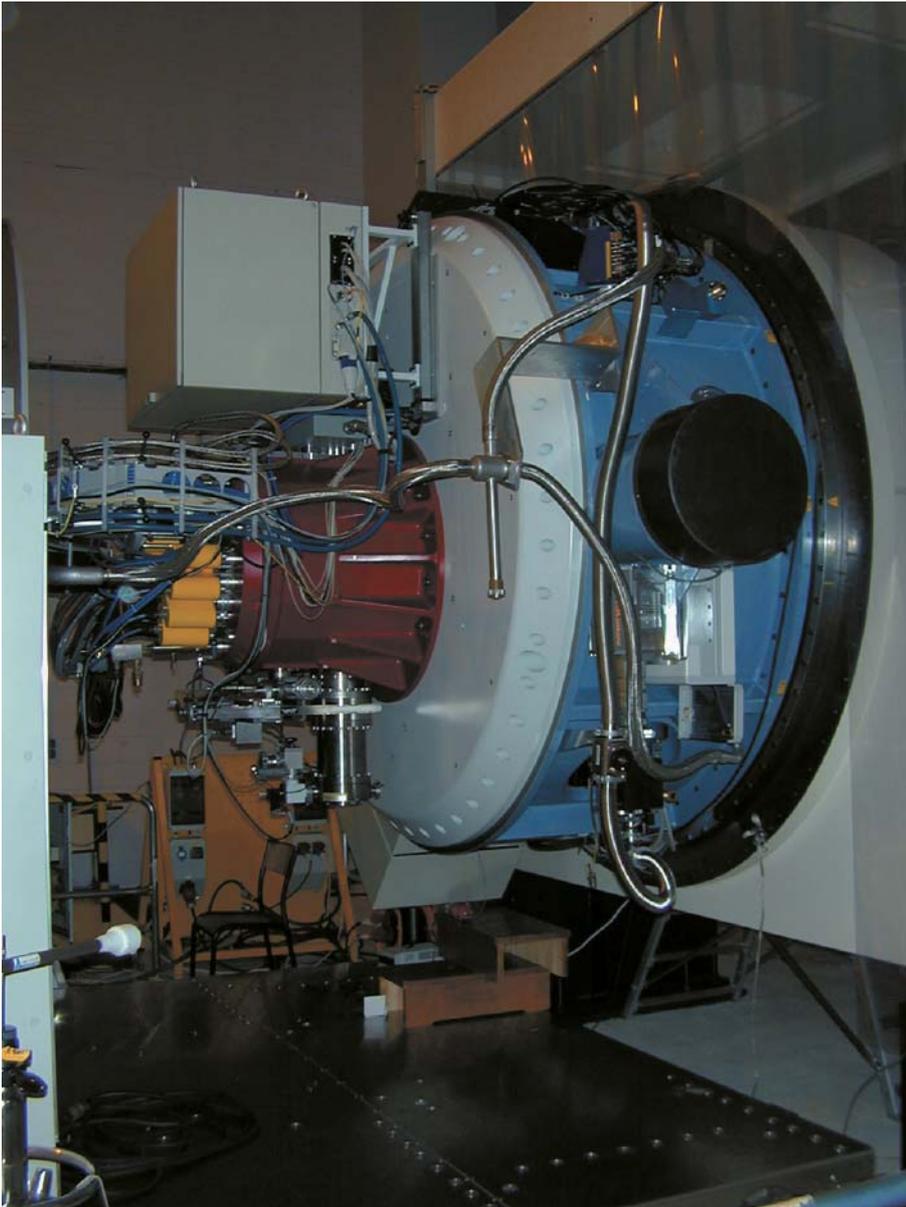


Abb. III.7: CONICA bei Tests in Meudon.

bis $2.5 \mu\text{m}$), einem Satz von 20 Standardfarbfiltern und 15 schmalbandigen Filtern sowie Wollaston-Prismen und Polarisationsfiltern für die Messung der linearen Polarisation ausgedehnter Objekte. Außerdem bieten vier Grisms die Möglichkeit für zweidimensionale Spektraluntersuchungen bei mittlerer spektraler Auflösung. Damit wird sich das Instrument für alle aktuellen Forschungsbereiche einsetzen lassen.

Im Berichtsjahr wurde die Infrarotkamera in den Labors des Instituts fertiggestellt, so dass die ESO das gesamte Gerät im Sommer abnehmen konnte. Dort wurde es wochenlang auf Herz und Nieren getestet und nach eini-

gen Optimierungsarbeiten in ein Großlabor nach Meudon bei Paris transportiert, wo die gesamte Plattform des Nasmyth-Fokus des VLT nachgebildet ist. Dort wurde CONICA zusammen mit der adaptiven Optik NAOS getestet (Abb. III.7). Verlaufen alle Tests nach Plan, wird CONICA im Sommer 2001 nach Chile transportiert.

Bei den Beobachtungen mit CONICA werden Untersuchungen von Sternentstehungsgebieten und protoplanetaren Staubscheiben sowie des Galaktischen Zentrums im Vordergrund stehen. Im extragalaktischen Bereich werden voraussichtlich Beobachtungen der Zentralgebiete aktiver Galaxien und das Studium entfernter Infrarotgalaxien hohe Priorität erhalten. Den Astronomen der beiden MPIs werden als Lohn für ihren Einsatz 45 Beobachtungsnächte mit CONICA zur Verfügung stehen.

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 (Abb. III.8). Ein solches Interferometer verfügt über die räumliche Auflösung eines Einzelteleskops, dessen Spiegeldurchmesser der Basislänge der beiden interferometrisch gekoppelten Teleskope entspricht. Zwei 130 Meter entfernt stehende Teleskope des VLT werden dann im nahen Infrarot eine Auflösung von einigen tausendstel Bogensekunden erzielen.

Eins von drei geplanten Interferometern, genannt MIDI, wird unter der Federführung des MPIA entwickelt und gebaut. Beteiligt sind auch Kollegen aus den Niederlanden und Frankreich sowie am Kiepenheuer-Institut in Freiburg und an der Thüringischen Landessternwarte Tautenburg. MIDI soll Interferometrie mit zwei Teleskopen bei Wellenlängen von $8\ \mu\text{m}$ bis $13\ \mu\text{m}$ ermöglichen und wird in puncto räumlicher Auflösung einen gewaltigen Fortschritt bedeuten. MIDI soll innerhalb eines Bildfeldes mit etwa $2''$ eine Auflösung um $0''.02$ Durchmesser erzielen. Der Detektor besteht aus einem Array mit 320×240 Pixel, wobei ein Pixel $50\ \mu\text{m}$ Kantenlänge besitzt. 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. Wegen der intensiven Hintergrund-Wärmestrahlung müssen große Teile des Instruments gekühlt werden. Der Detektor wird mit 4 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 durch ein optisches System, das in einem Tunnel unterhalb der Teleskope (Delay Line genannt) auf einem Wagen fährt. An ihm werden die von den Teleskopen kommenden Lichtbündel reflektiert und deren Weglängen durch Verschieben des Systems ausgeglichen. Die Delay Line wurde im Berichtsjahr auf dem Cerro Paranal in Chile erstmals erfolgreich getestet (Abb. III.8). Im Innern von MIDI wird die restliche Weglängendifferenz durch piezoelektrisch betriebene, verschiebbare Spiegel ausgeglichen. Ein Strahlteiler vereint die Strahlen zum Interferenzbild.

Nachdem im Februar 2000 bei der ESO das Final Design Review durchgeführt worden war, konnte im Berichtsjahr nahezu die gesamte Hardware gefertigt werden. So wurde zum Beispiel das 500 kg schwere Kühlgehäuse des Instruments zusammengebaut und die Detektorauslese-Elektronik getestet (Abb. III.9). Auch die Konzeption der Kontrollelektronik konnte abgeschlossen werden. Die Kollegen vom Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik haben auch die »warme Optik« angeliefert: Sie übernimmt den Wegausgleich der beiden Lichtbündel. Dieses System wurde im Institut justiert und eingehend getestet. Die ESO hat den optischen Tisch geliefert, der

Abb. III.8: Die Delay Line des Interferometers unterhalb der Teleskope des VLT (Bild: ESO).



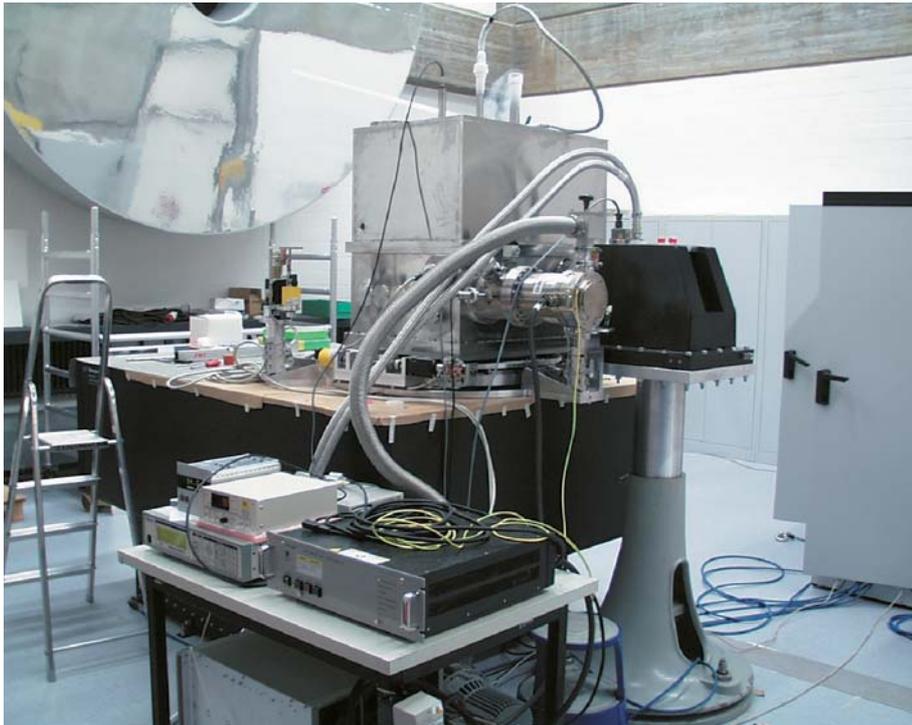


Abb. III.9: Die Kühleinheit von MIDI bei Tests im MPIA.

später auch auf dem Cerro Paranal verwendet wird. Die Platte muss äußerst stabil und erschütterungsfrei sein. Sie misst daher 2.1 mal 1.5 Meter und ist 61 cm dick. Hierauf konnte im November mit der Integration des MIDI-Instruments begonnen werden. Die ersten Tests der gekühlten Optik fallen im Frühjahr 2001 an, wenn das niederländische Partnerinstitut ASTRON dieses System ans MPIA geliefert haben wird.

Nach derzeitiger Planung sollen erste interferometrische Beobachtungen mit zwei 8-Meter-Teleskopen des VLT in der zweiten Hälfte des Jahres 2002 beginnen. Das Instrumenten-Team erhält, über mehrere Jahre verteilt, insgesamt 30 Beobachtungsnächte an den 8-m-Teleskopen und eine etwa dreimal so große Zahl an den 1.8-Meter-»Auxiliary«-Teleskopen.

Derzeit ist geplant, MIDI insbesondere für die Beobachtung von aktiven galaktischen Kernen (Schwarzen Löchern), jungen Sternen, extrasolaren Planeten, zirkumstellaren Staubhüllen und protostellaren und protoplanetaren Scheiben sowie Doppelsternen einzusetzen.

PACS – Infrarotkamera 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 3.5-Meter-Spiegel und drei wis-

senschaftliche Instrumente, die einen Wellenlängenbereich von 60 μm bis 700 μm abdecken sollen. Sie werden von internationalen Wissenschaftskonsortien entworfen und gebaut. Ein Schwerpunkt des Forschungsprogramms wird in der Beobachtung protostellarer Staubwolken und protoplanetarer Staubscheiben liegen. Auch die Infrarotstrahlung sehr weit entfernter, junger Galaxien im Submillimeterbereich wird nachweisbar sein. Das MPIA wird sich am Bau eines der Instrumente, genannt PACS (Photoconductor Array Camera and Spectrometer), beteiligen. Die Projektleitung liegt beim MPE.

PACS soll photometrische und spektrometrische Untersuchungen im Wellenlängenbereich zwischen 60 μm und 210 μm ermöglichen. Das MPIA wird zu der Entwicklung der Kameras und Vorverstärker sowie des Fokalebenen-Choppers und zum Datenzentrum wesentlich beitragen. Aufbauend auf den Erfahrungen mit ISO wird das Institut an den detaillierten Planungen zum Aufbau des Bodensegmentes für HERSCHEL und insbesondere des Kontrollzentrums für PACS beteiligt sein. Das Institut wird auch für alle Aspekte der Kalibration von PACS während des Fluges verantwortlich sein.

Nachdem 1999 am Institut der Prototyp eines Choppers angefertigt und getestet wurde (Abb. III.10), erhielt die Firma C. ZEISS in Oberkochen den Auftrag für den Bau eines flugtauglichen Modells. Ein Chopper hat folgende Aufgabe: Bei Infrarotbeobachtungen kann ein mehr oder weniger starkes, störendes Hintergrundsignal zum Beispiel durch Wärmestrahlung des Teleskops entstehen. Um dieses berücksichtigen zu können, wird während der Beobachtungen abwechselnd das untersuchte Objekt und ein benachbarter leerer Himmelsausschnitt vermessen.

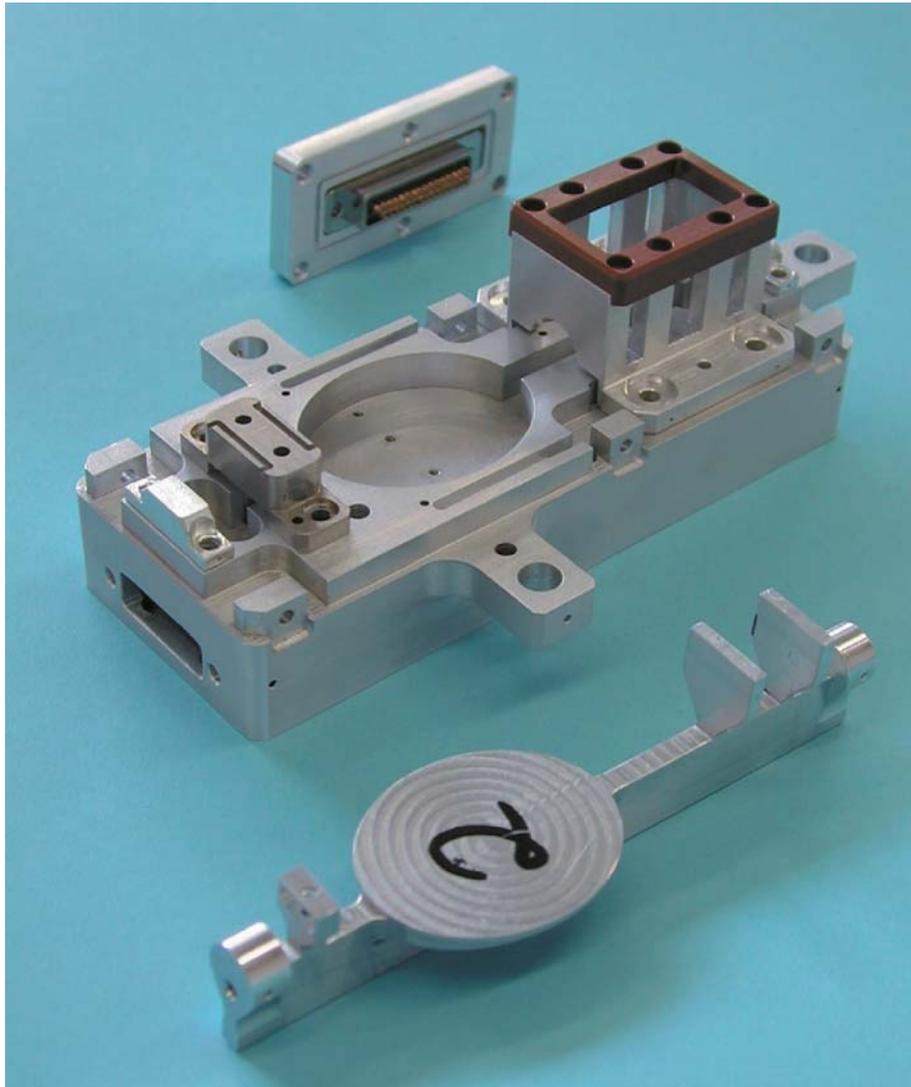


Abb. III.10: Der PACS-Chopper im Labor des MPIA.

Letzterer liefert den Hintergrund, der später von der eigentlichen Beobachtung abgezogen wird. Die alternierende Beobachtung zweier Himmelsgebiete erreicht man, indem man im Strahlengang einen Spiegel anbringt, der ständig hin und her kippt, oder auf englisch: choppt.

LUCIFER und LINC – zwei Instrumente für das LBT

Wie in Kapitel I 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 bisher konstruierten Teleskope, wird das LBT zwei von einer gemeinsamen Montierung getragene Spiegel besit-

zen. Jeder Spiegel hat einen Durchmesser von 8.4 Metern. Mit dem ersten Spiegel soll das Teleskop 2004 in Betrieb gehen, der zweite Spiegel folgt ein Jahr später. Dann wird auch Interferometrie möglich sein.

Die deutschen Partner bauen unter der Leitung der Heidelberger Landessternwarte für das LBT zwei Nahinfrarot-Spektrographen, genannt LUCIFER (Abb. III.11). 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 MPIA erfolgen. Außer dem MPIA und der Landessternwarte sind das MPI für extraterrestrische Physik in Garching, die Universität Bochum sowie die Fachhochschule für Technik und Gestaltung in Mannheim an der Entwicklung und dem Bau von LUCIFER beteiligt.

Das erste Exemplar von LUCIFER soll Anfang 2004 im Brennpunkt des ersten großen Spiegels arbeiten. Das baugleiche zweite Exemplar wird 13 Monate später im Fokus des zweiten Spiegels in Betrieb gehen. Mit LUCIFER werden sowohl Direktaufnahmen als auch Langspaltspektroskopie im Bereich von $0.85 \mu\text{m}$ bis $2.45 \mu\text{m}$ möglich sein.

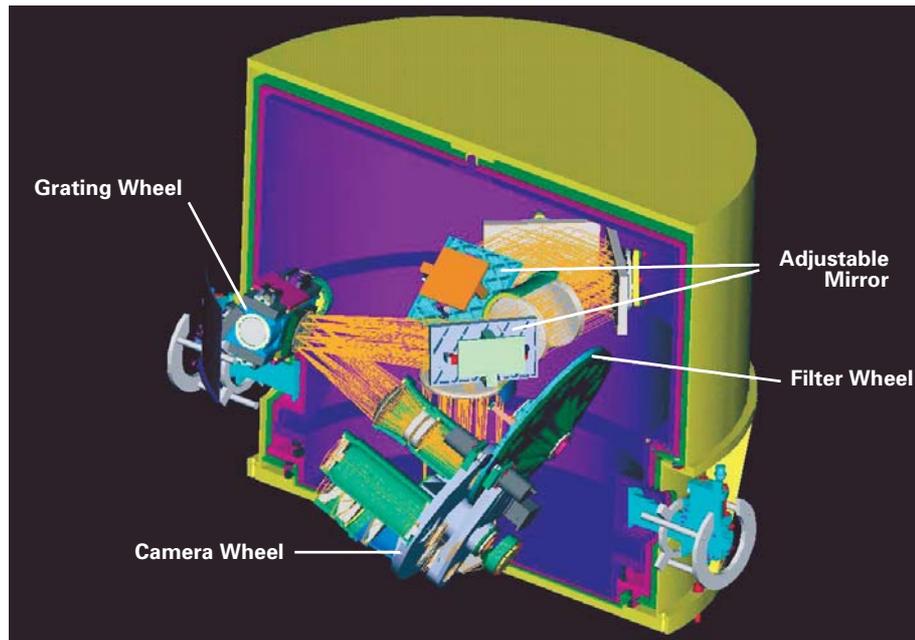


Abb. III.11: Das optische und mechanische Design von LUCIFER.

Um störende Wärmestrahlung des Instruments zu unterdrücken, wird LUCIFER mit flüssigem Stickstoff auf etwa -200 C gekühlt. Insgesamt sind sechs Beobachtungsmodi vorgesehen:

Seeing-begrenzt:

- Aufnahmen mit einem Bildfelddurchmesser von $4'$,
- Langspaltspektroskopie über eine Länge von $4'$,
- Multiobjektspektroskopie.

Beugungsbegrenzt:

- Aufnahmen mit einem Bildfelddurchmesser von $0.5'$
- Langspaltspektroskopie, sowie
- integrale Feldspektroskopie.

Bei beugungsbegrenzten Aufnahmen liefert das LBT eine hervorragende Auflösung. Sie beträgt, abhängig von der Wellenlänge, $0''.031$ bei $1.23\ \mu\text{m}$, und bis zu $0''.056$ 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 darüber hinaus von der Spektroskopie sehr schwacher roter Sterne und Brauner Zwerge. Auch Staubscheiben um junge Sterne und in den Zentral-

gebieten aktiver Galaxien zählen zu den vorrangigen Beobachtungsobjekten.

Eines der ambitioniertesten Instrumente am LBT wird das Fizeau-Interferometer LINC sein, in dem die Lichtbündel der beiden Primärspiegel phasengleich zusammengeführt werden. Das eröffnet eine bisher unerreichte räumliche Auflösung. Gepaart mit der enormen Lichtstärke der beiden Spiegel wird das LBT damit weltweit eine Vorreiterrolle einnehmen. Ein Instrument wie LINC ist noch nie zuvor gebaut worden und erfordert ein äußerst anspruchsvolles optisches Design.

Das MPIA plant hierfür die Optik der Strahlzusammenführung (Abb. III.12). Das Institut ist dabei in ein Konsortium mit Kollegen von der Universität Köln und dem Astrophysikalischen Institut in Arcetri (Florenz) 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. Für das nahe Infrarot von $1\ \mu\text{m}$ bis $1.4\ \mu\text{m}$ ist ein Infrarot-Array mit 2048×2048 , jeweils $18\ \mu\text{m}$ großen Pixel gedacht.

Das Interferometer soll im Zusammenhang mit einem adaptiven optischen System laufen. Das System korrigiert, abhängig von der Wellenlänge, ein Feld zwischen $5''$ und $20''$. Auch die erzielbare Auflösung ist wellenlängenabhängig. Sie liegt zwischen $0''.0062$ bei $0.7\ \mu\text{m}$ und $0''.02$ bei $2.2\ \mu\text{m}$.

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

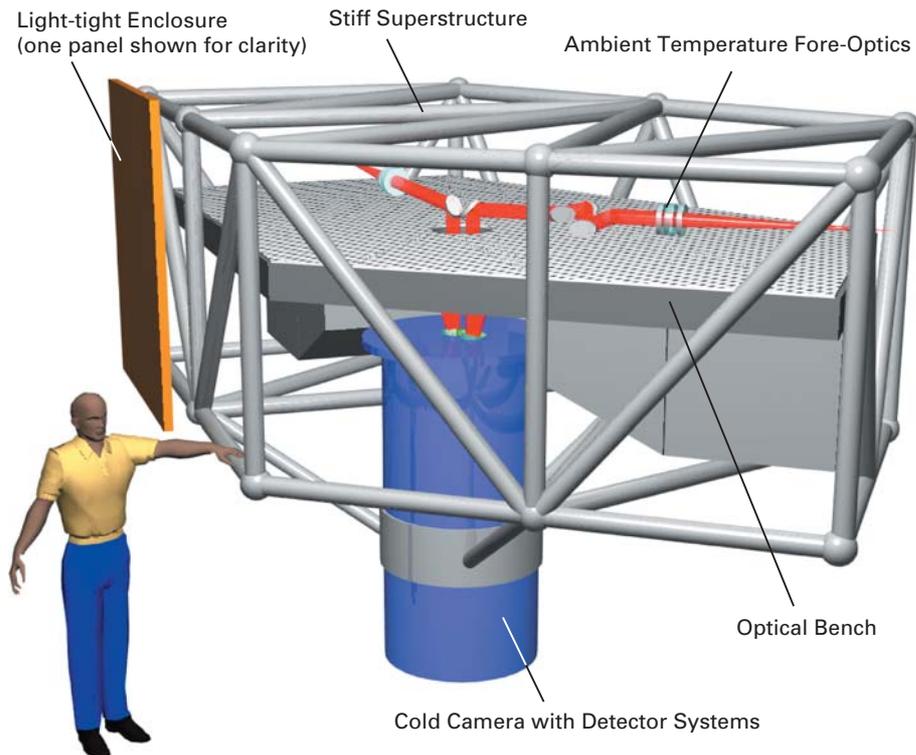


Abb. III.12: Die derzeit favorisierte Optik von LINC.

ISOPHOT: Streulichtmessung bei Sonnenfinsternis

Wie in Kapitel I berichtet, hat das Institut einen maßgeblichen Anteil an dem wissenschaftlichen Erfolg des europäischen Infrarotobservatoriums ISO. Unter der Federführung des MPIA entstand das Instrument ISOPHOT, und mit dem ISOPHOT-Datenzentrum hat das MPIA eine bedeutende Aufgabe in der postoperationellen Phase übernommen. Seit dem Bau des Teleskops begleitete die

Astronomen des Instituts ein Problem: die Unterdrückung des Streulicht innerhalb dieses Instruments. Erst jetzt konnte dieser Störfaktor in allen seine Facetten quantitativ ausgewertet werden.

Streulicht kann auf unterschiedliche Weise auf die Detektoren gelangen und das Messergebnis verfälschen. So musste bei allen Beobachtungen sorgfältig darauf geachtet werden, dass kein Streulicht von hellen Objekten, wie der Erde oder der Sonne, ins Teleskop eindringt. Das Teleskop war ummantelt von einem heliumgekühlten, langen Blendensystem, das an der Vorderseite eine passiv

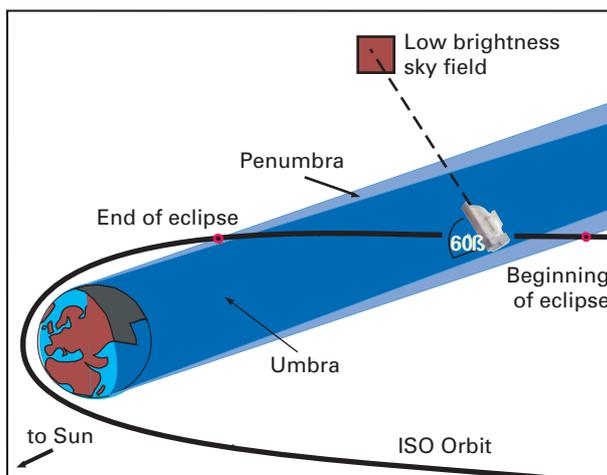


Abb. III.13a: Im September 1997 durchflog ISO den Erdschatten. In dieser Phase wurden Messungen des gestreuten Sonnenlichts vorgenommen.

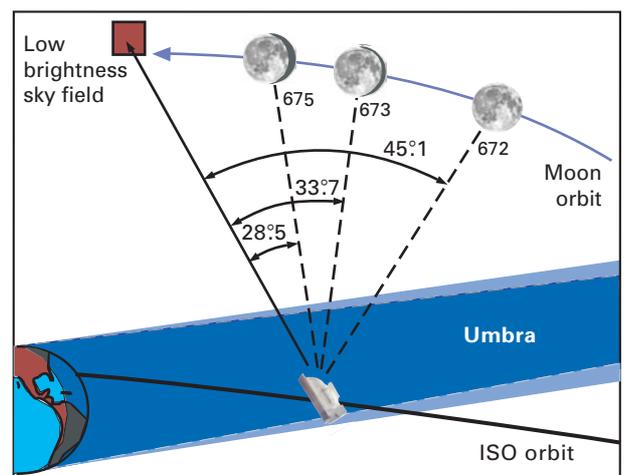


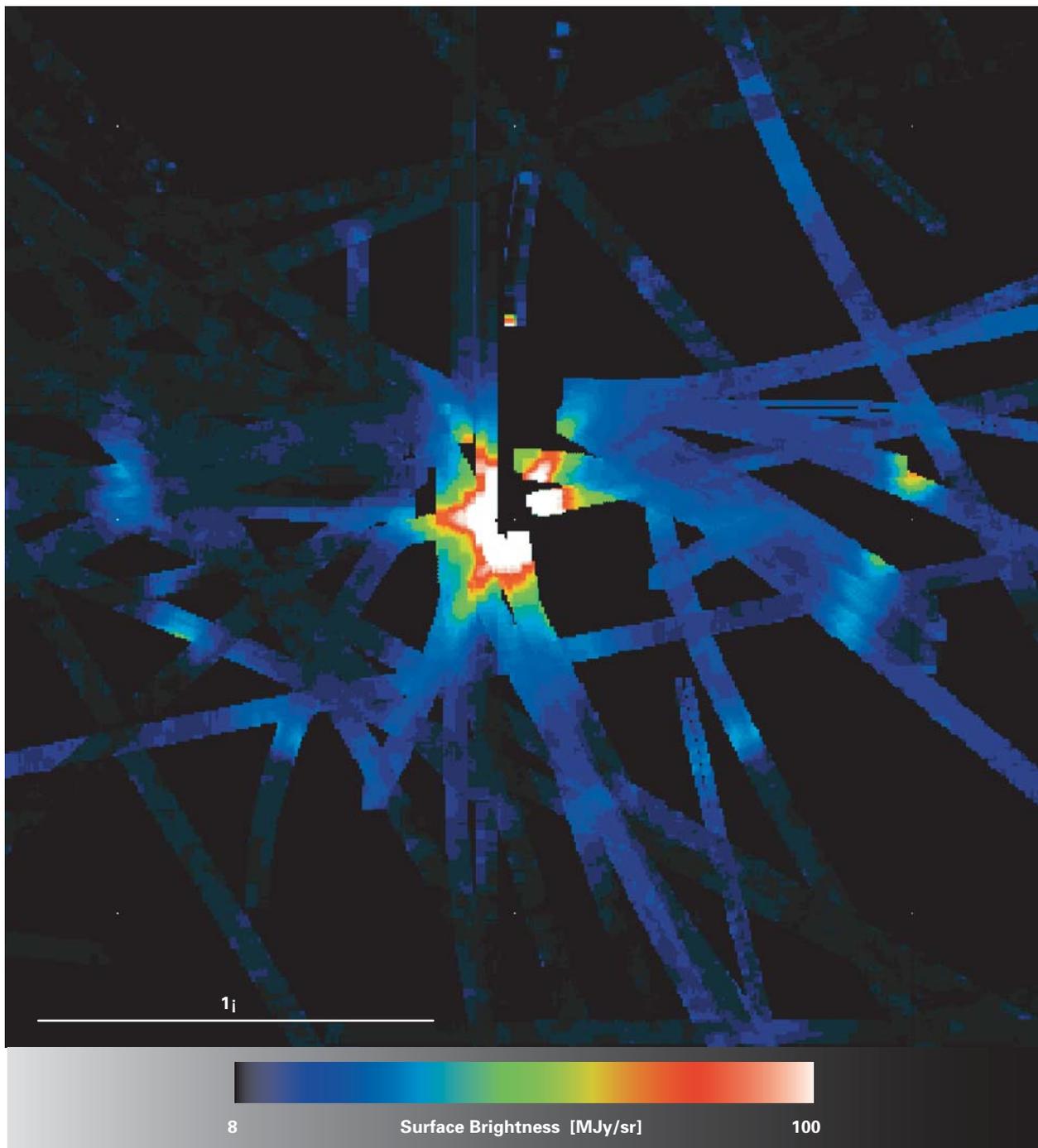
Abb. III.13b: Während ISO dreimal den Erdschatten durchflog, näherte sich der Mond dem Blickfeld des Teleskops. Dies ließ sich für Messungen des gestreuten Mondlichts nutzen.

gekühlte Sonnenblende besaß. Gleichzeitig hatten Astronomen vorher festgelegt, dass zu den Blickrichtungen auf folgende Objekte entsprechende Mindestabstände eingehalten werden: Sonne 60 Grad, Erde 73 bis 87 Grad, Mond 24 Grad und Jupiter 5 Grad.

Um eigene thermische Strahlung zu vermeiden, wurden das Teleskop und die Messinstrumente teilweise bis auf 4 K gekühlt. Zudem wurden alle Innenteile mit einer für das Infrarote »schwarzen« Farbe gestrichen. Während der gesamten Bauphase flossen mehrfach Ratschläge der Infrarotastronomen des Instituts in die Konstruktion ein.

Zusätzlich zu diesen Vorsichtsmaßnahmen wurde während der Konstruktionsphase mit Hilfe von Computersimulationen versucht, das verbleibende Streulicht theoretisch zu quantifizieren. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die Strahlung von Erde und Mond bei $25\ \mu\text{m}$ und auf die teleskopeigene thermische Strahlung bei $170\ \mu\text{m}$

Abb. III.14: Saturn bei $170\ \mu\text{m}$ Wellenlänge. Man erkennt die Struktur der Beugung an der Sekundärspiegelhalterung sowie ein schwaches Geisterbild in etwa einem Grad Abstand.



μm gelegt. Sie erschien besonders kritisch. Die Simulationen versprachen, dass das Streulicht in allen Fällen unter 10 % der natürlichen Nachthimmelshelligkeit bleiben würde.

Da ISO länger arbeitete als ursprünglich erwartet, ergab sich im September und Oktober 1997 die einzigartige Situation, dass das Teleskop während photometrischer Beobachtungen durch den Erdschatten flog. Aus der Sicht ISOs ereignete sich also eine Sonnenfinsternis (Abb. III.13a). Dies ermöglichte die Durchführung eines einmaligen Experiments zur Messung des Streulichts von der Sonne. Dazu wurde ein Himmelsfeld in 60 Grad Abstand von der Sonne kurz vor, während und kurz nach der Finsternis beobachtet. Ein signifikanter Streulichtanteil der Sonne sollte sich dann durch einen erhöhten Infrarot-hintergrund vor und nach der Finsternis zeigen. Besonders vorteilhaft an diesem Verfahren ist die Tatsache, dass man eine sehr helle Quelle gewissermaßen ein- und ausschaltet, ohne dass die Einstellungen am Teleskop geändert werden müssen, dieses also ungestört weitermisst. Nach eingehender Auswertung der Messdaten zeigte sich im Rahmen der Empfindlichkeit kein nachweisbares Streulichtsignal von der Sonne.

Während der Finsternisse konnten keine Kommandos an den Satelliten abgesandt werden. Dennoch ließen sich diese Messungen auch dazu nutzen, das möglicherweise gestreute Mondlicht zu ermitteln. ISO durchflog bei drei aufeinander folgenden Erdumläufen den Erdschatten. In dieser Zeit wanderte der Mond am Himmel in Richtung auf ISOs Beobachtungsfeld zu. Sein Abstand verringerte sich pro Umlauf von 45 über 33 auf 28 Grad (Abb. III.13b). Ein möglicher Streulichtanteil des Mondes hätte also von einem Umlauf zum anderen zunehmen müssen. Auch dies ließ sich im Rahmen der Messgenauigkeit nicht nachweisen. Zum selben Ergebnis führten Messungen des

Streulichts von der Erde, das die Astronomen am meisten gefürchtet hatten.

Eine kleine Überraschung erlebten die Astronomen indes, als sie den Einfluss eines sehr hellen, punktförmigen Objekts auf die Messung untersuchten. Die direkten Beobachtungen heller Objekte hatten bereits gezeigt, dass im Abstand von 15' um die Quelle herum kein Streulicht nachweisbar war. Durch Zufall stießen dann aber Astronomen des Instituts auf ein unvorhergesehenes Phänomen. Das Teleskop war in einigen Fällen bei Schwenks von einem Beobachtungsobjekt zum nächsten einige Male zufällig nahe an dem Planeten Saturn vorbeigezogen. Aus den Daten ließ sich ein Bild des im Infraroten sehr hellen Planeten erstellen (Abb. III.14). Dieses zeigte eine strahlenartige Form. Sie wird auf Beugung an der Halterung des Sekundärspiegels zurückgeführt. In einem Abstand von etwa einem Grad ist das Planetenbild zudem von einem schwachen Ring umgeben. Dessen Intensität beträgt etwa ein Prozent des zentralen Bildes.

Die Ursache dieses »Geisterbildes« ist nicht abschließend geklärt. Die Astronomen vermuten aber, dass es durch Licht erzeugt wird, das in flachem Winkel auf eine Haube über dem Sekundärspiegel fällt und von dort auf den Detektor reflektiert wird. Ein solcher Effekt ließe sich bei zukünftigen Teleskopen verringern oder sogar gänzlich vermeiden, wenn man eine kleinere Sekundärspiegelhalterung baut.

Insgesamt führten die Untersuchungen zu dem beruhigenden Ergebnis, dass in 99 % aller Daten keine Streulichtkorrekturen nötig sind. Lediglich bei schwächeren, ausgedehnten Objekten ist unter Umständen eine genauere Datenanalyse nötig. Die beschriebenen Ergebnisse der Streulichtmessungen, insbesondere in Bezug auf die Sekundärspiegelhalterung, werden in die Konstruktion zukünftiger Infrarot-Weltraumteleskope, wie HERSCHEL, einfließen.

IV Wissenschaftliche Arbeiten

IV.1 Galaktische Astronomie

Rotation junger Sterne

Sterne entstehen durch Gravitationskollaps in den dichtesten Regionen von Molekülwolken. Gegen Ende dieser Kollapsphase bildet sich aufgrund der Rotation der Wolke um den Stern eine Scheibe aus Gas und Staub. Bei diesem Vorgang sammelt der Stern Materie aus der Scheibe auf und erhält dadurch immer mehr Drehimpuls: Er dreht sich also immer schneller. Ohne eine bremsende Einwirkung würde irgendwann der Drehimpuls und damit die Fliehkraft so groß werden, dass der Protostern nicht weiter Material aus der Umgebung auf sammeln und kontrahieren kann. Die jungen Sterne müssen also während der Akkretionsphase abgebremst werden. Dies geschieht in unter-

schiedlichen Entwicklungsphasen auf unterschiedliche Weise. Astronomen aus den USA und vom MPIA haben von jungen Sternen die Rotationsgeschwindigkeiten gemessen und sind dabei auf einen Zusammenhang zwischen der Rotation des Sterns und der Ausbildung der ihn umgebenden Scheibe gestoßen. Sie konnten damit die Bedeutung der Scheibe für die Drehimpulsentwicklung bei jungen Sternen weiter untermauern. Möglich wurden diese Beobachtungen vor allem durch die am Institut gebaute Weitfeldkamera.

Abb. IV.1: Der junge Sternhaufen im Orion-Nebel, aufgenommen mit der Weitfeldkamera.





Abb. IV.2: Der junge Sternhaufen IC 348, aufgenommen im nahen Infrarot. (Bild: 2MASS, Univ. Massachusetts)

Sterne mit etwa einer Sonnenmasse und einem Alter bis zu etwa einer Million Jahren werden nach dem Prototypen T Tauri benannt. Heute unterscheidet man sie aufgrund der Emissionslinien in ihrem Spektrum. Einige T-Tauri-Sterne haben starke Linien, andere schwache. Beide Typen haben gemeinsam, dass ihre Helligkeit variiert. Während die klassischen T-Tauri-Sterne starke Emissionslinien besitzen und typischerweise unregelmäßige Helligkeitsschwankungen auf sehr großen Zeitskalen von Stunden bis Jahren zeigen, findet man bei den T-Tauri-Sternen mit schwachen Linien überwiegend gleichmäßige Helligkeitsvariationen mit Perioden von mehreren Tagen.

Die Astronomen gehen heute davon aus, dass die klassischen T-Tauri-Sterne noch von einer dichten Scheibe umgeben sind, aus der sie Materie aufsammeln. Hierbei kommt es zu Störungen in der Scheibe, bei denen die Materie in stärkeren Schüben auf den Stern herunterstürzt. Das ruft die beobachteten unregelmäßigen Helligkeitsvariationen hervor.

Die T-Tauri-Sterne mit schwachen Linien sind hingegen entwicklungsgeschichtlich etwas älter. Sie haben ihre Scheibe frühzeitig verloren oder diese ist rasch ausgedünnt. Dies kann beispielsweise ein naher Begleitstern verursachen. Ihre periodischen Helligkeitsvariationen werden – so die Vermutung – durch große Sternflecken auf der Oberfläche hervorgerufen. Die Helligkeit nimmt immer dann ab, wenn der Fleck durch die Rotation von der Erde aus gesehen auf die Vorderseite des Sterns wandert. Bleibt ein solcher Fleck über mehrere Rotationsperioden hinweg stabil, so entspricht die Periode der Helligkeitsvariation genau der Rotationsperiode. Damit ergibt sich die Möglichkeit, das Rotationsverhalten junger Sterne zu studieren und möglicherweise herauszufinden, wann und wie sie ihren überschüssigen Drehimpuls verlieren.

Obwohl die Helligkeitsschwankungen junger Sterne schon lange bekannt sind, blieb deren Studium häufig auf Einzelobjekte beschränkt. Ein Grund hierfür besteht darin, dass viele Sternentstehungsgebiete sehr ausgedehnt sind. Sie lassen sich daher auf den üblicherweise kleinen Bildausschnitten der Teleskope nicht im Ganzen abbilden. Diese Lücke schließt seit Ende 1998 die Weitfeldkamera, die Astronomen des MPIA und der ESO gebaut haben

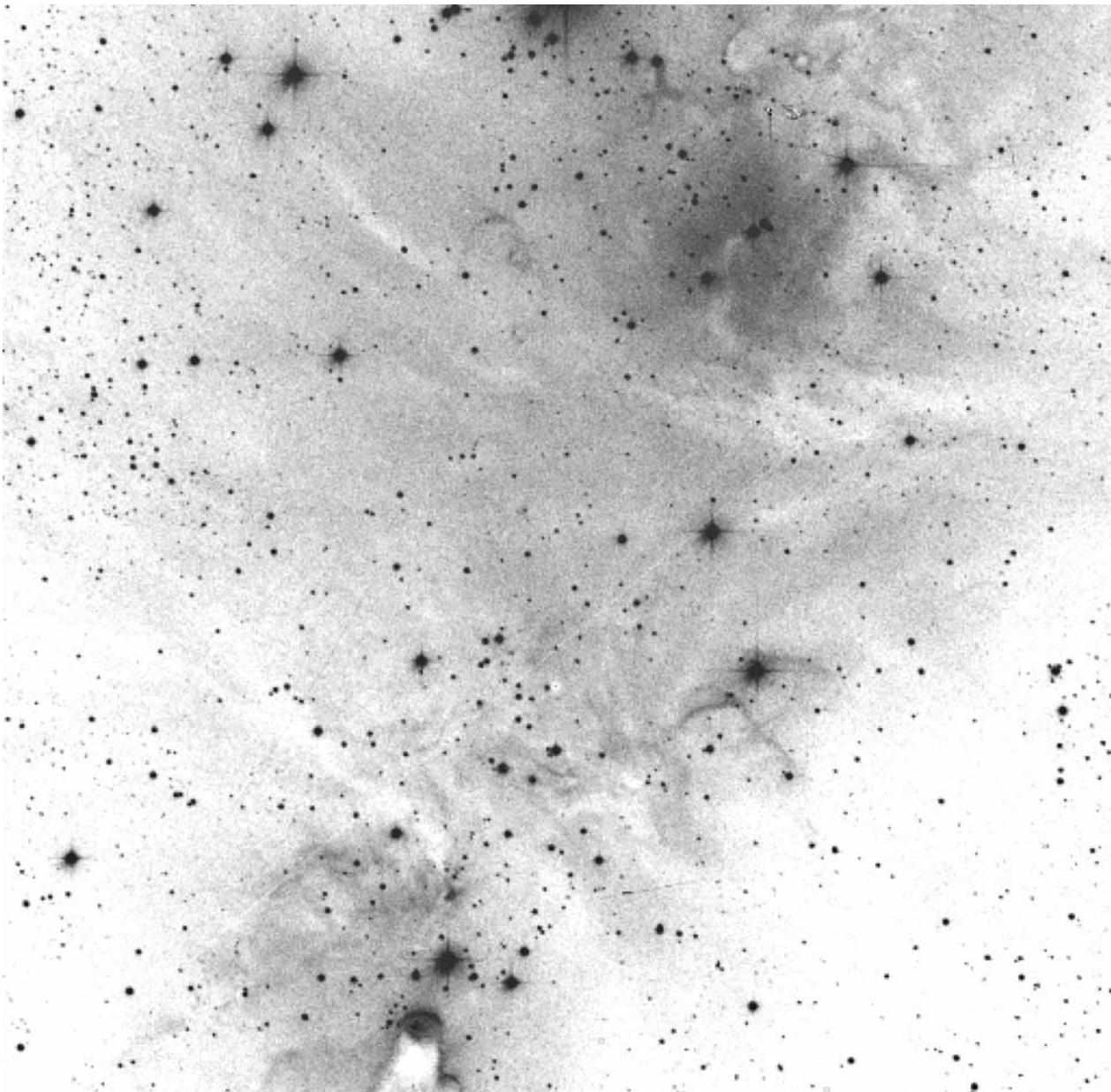
(s. Jahresbericht 1998, S. 33). Sie besitzt ein ungewöhnlich großes Bildfeld mit 33 Bogenminuten Kantlänge, entsprechend etwa dem Vollmonddurchmesser. Die Kamera arbeitet am 2.2-Meter-Teleskop auf La Silla, Chile. Für die vorliegende Studie wurde zudem ein kleineres Teleskop in den USA genutzt.

In Zusammenarbeit mit amerikanischen Kollegen wurden drei Sternhaufen unterschiedlichen Alters untersucht: der Orion-Nebel-Haufen (Abb. IV.1), dessen Entfernung 1500 Lj und dessen Alter etwa 1 Million Jahre beträgt; IC 348 (Abb. IV.2) in 850 Lj Entfernung, Alter etwa 1.3 Millionen Jahre; und NGC 2264 (Abb. IV.3): Entfernung etwa 2400 Lj, Alter etwa 2-3 Millionen Jahre.

Bei einer Beobachtungskampagne um den Jahreswechsel 1998/1999 konnten die Astronomen auf La Silla den Orion-Nebel-Haufen während mehr als 50 Nächten beob-

achten. Dieser eignet sich für eine solche Studie ausgezeichnet, weil sich dort innerhalb eines relativ kleinen Gebietes rund 2300 junge Sterne beobachten ließen. So weit es die anderen Forschungsprogramme an diesem Teleskop erlaubten, wurde das Sternfeld in jeder Nacht mehrmals aufgenommen. Hieraus ergaben sich anschließend die Lichtkurven der Sterne. Insgesamt konnten bei 400 Sternen periodische Helligkeitsvariationen nachgewiesen werden (Abb. IV.4). Allein durch diese Beobachtungsreihe hat sich der bis dahin vorhandene Bestand an solchen Messwerten nahezu verdreifacht. Da dieser Sternhaufen schon häufig von anderen Astronomen untersucht worden ist, lagen bereits für 335 dieser Veränderlichen Mas-

Abb. IV.3: Der Offene Sternhaufen NGC 2264.



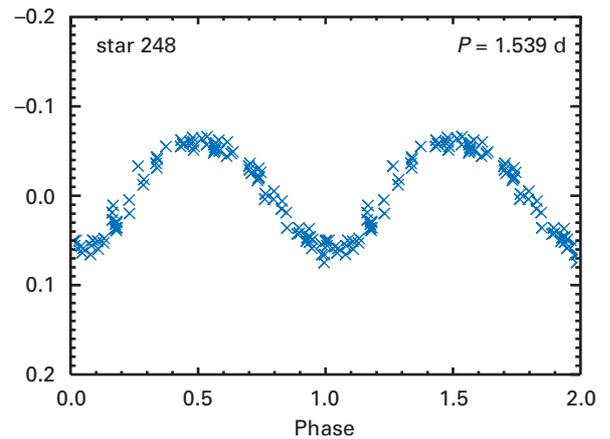
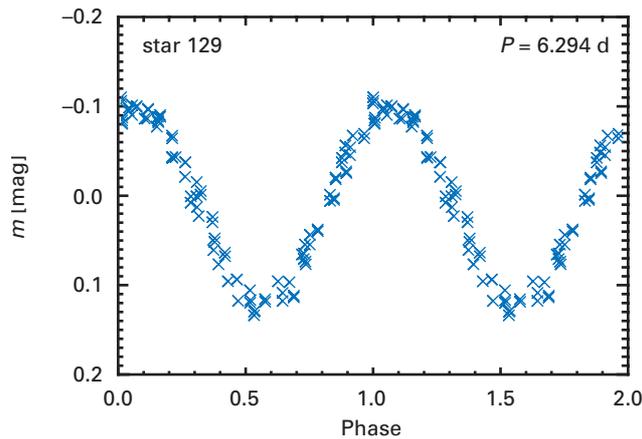


Abb. IV.4: Zwei Beispiele für Lichtkurven von periodisch veränderlichen Mitgliedern des Sternhaufens im Orion-Nebel.

senbestimmungen vor. Bei der anschließenden Analyse spielte daher dieser Haufen die zentrale Rolle.

Interessant war in einem zweiten Schritt ein Vergleich der Rotationsperioden unterschiedlich alter Sterne. Hierzu verglichen die Astronomen die Sterne der nur eine Million Jahre alten Haufen im Orion und IC 348 mit dem drei Mal so alten Haufen NGC 2264. Hierbei beschränkten sie sich auf Sterne mit mehr als 0.25 Sonnenmassen. (Der Hintergrund dieser Grenze wird weiter unten erklärt.) Wie aus

Abb. IV.5 ersichtlich, zeigen die beiden Gruppen ein unterschiedliches Verhalten. Die Rotationsperioden weisen bei den jüngeren Sternen im Orion und IC 348 eine Verteilung mit zwei Maxima auf. Die eine Gruppe hat Rotationsperioden von etwa zwei Tagen, die andere von etwa acht Tagen. Bei den älteren Sternen in NGC 2264 scheint diese bimodale Verteilung nicht vorhanden zu sein. Auch wenn die Anzahl der Sterne in NGC 2264 nicht sehr hoch und die Statistik damit nicht sehr gut ist, rotiert doch der überwiegende Teil mit Perioden von zwei bis fünf Tagen. Von diesem Haufen sind weitere Beobachtungen mit der Weitfeldkamera geplant.

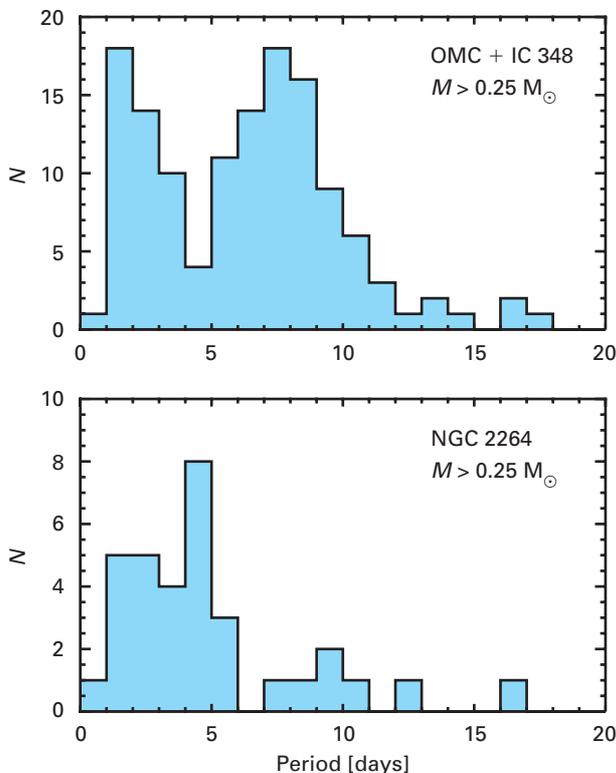


Abb. IV.5: Verteilung der Rotationsperioden von Sternen mit mehr als 0.25 Sonnenmassen. Oben die jungen Sterne im Orion-Haufen und in IC 348, unten die älteren Sterne in NGC 2264.

Zirkumstellare Scheibe bewirkt Drehimpulsverlust

Dieses Beobachtungsergebnis lässt sich weitgehend im Rahmen einer Theorie erklären, nach der die zirkumstellare Scheibe eine entscheidende Rolle spielt. Dabei geht man davon aus, dass die jungen Sterne ein Magnetfeld besitzen. Zahlreiche Beobachtungen stützen diese Annahme. Letztlich sind auch die Sternflecken, die für die Helligkeitsvariationen verantwortlich gemacht werden, eine Folge von Magnetfeldern. Das Feld erstreckt sich weit in den Raum hinaus und geht auch mit elektrisch geladenen Teilchen der Scheibe, die den Stern umgibt, eine Wechselwirkung ein. Wie ein Mixer im Teig rührt das Magnetfeld in der Scheibe. Dabei wird es abgebremst, was sich auf die Rotation des Sterns überträgt. Computersimulationen belegen, dass dieses so genannte »disk locking« einen jungen Stern innerhalb von einer Million Jahre auf die halbe Rotationsgeschwindigkeit abbremsen kann.

Die neuen Beobachtungsdaten lassen sich im Rahmen dieser Theorie wie folgt erklären: In den beiden jüngeren Haufen, im Orion und IC 348, sind die zirkumstellaren Scheiben noch bei einem größeren Bruchteil von Sternen ausgeprägt und bei dieser Gruppe ist das disk locking von großer Bedeutung.

Einige der Sterne sind dadurch bereits abgebremst. Die langsam rotierenden Sterne sind noch von Scheiben umgeben, die schnellen haben keine Scheiben mehr. Da die Sterne schrumpfen, rotieren sie immer schneller.

Was den Unterschied zwischen beiden Gruppen ausmacht, ist damit nicht geklärt. Er könnte auf Unterschiede in den Massen der Sterne zurückzuführen sein, die, abgesehen von der Mindestmasse von 0.25 Sonnenmassen, nicht berücksichtigt wurden. Beobachtungen im Infrarotbereich deuten an, dass die langsam rotierenden Sterne zur Klasse der schwachen T-Tauri-Sterne gehören. Sie sind vermutlich nicht mehr von einer Scheibe umgeben. In dem älteren Haufen NGC 2264 scheinen die Sterne überwiegend schneller zu rotieren. Das könnte bedeuten, dass dort seit längerem der Bruchteil junger Sterne mit Scheiben geringer ist. Damit wirkt das disk locking nicht mehr und die Sterne werden, da sie sich weiter zusammenziehen, wieder schneller.

Das würde bedeuten, dass sich ein großer Teil der zirkumstellaren Scheiben um T-Tauri-Sterne nach ein bis zwei Millionen Jahren auflösen, sei es weil der Stern fast die gesamte Materie aufgesammelt hat, oder weil er sie mit seinem intensiven Teilchenwind aufgelöst hat. Diese Zeitskalen ergeben sich auch aus anderen Beobachtungen. So kann man aus dem Fehlen intensiver Infrarotstrahlung von Staub («Infrarotexzesse») bei jungen Sternen auf ein etwas höheres Alter des Haufens schließen. Dies ist eine relativ kurze Zeitspanne und widerspricht einigen Theorien, wonach große Planeten wie Jupiter zu ihrer Entstehung mindestens zehn Millionen Jahre benötigen.

Die Untersuchung förderte darüber hinaus einen zweiten interessanten Aspekt zu Tage. Betrachtet man einmal nur die Sterne im Orion-Nebel, so findet sich auch eine Unterscheidung hinsichtlich der Massen (Abb. IV.6): Nur die Sterne mit mehr als 0.25 Sonnenmassen zeigen die beschriebene Zweiteilung der Rotationsperioden. Die masseärmeren Sterne in diesem Haufen verhalten sich anders. Sie zeigen eine breitere Verteilung der Rotationsperioden mit einem Maximum bei zwei bis drei Tagen. Die masseärmeren Sterne rotieren also im Schnitt schneller als die masseärmeren.

Dieses Phänomen lässt sich mit der Theorie der Sternentwicklung erklären. Bei Sternen mit mehr als 0.25 Sonnenmassen setzt nach etwa einer Million Jahren im Zentrum Fusion von Deuterium (schwerem Wasserstoff) ein. Dadurch heizt sich der Körper auf, was seiner Kontraktion entgegen wirkt. Er kann sich infolgedessen nicht mehr so stark zusammenziehen, seine Rotationsgeschwindigkeit nimmt also nicht mehr zu. Bei Sternen mit weniger als 0.25 Sonnenmassen erreichen Temperatur und Druck erst später die Grenzwerte zum Deuterium-Brennen. Sie ziehen sich ungehindert weiter zusammen und werden immer schneller.

Der Zusammenhang zwischen der Rotationsgeschwindigkeit junger T-Tauri-Sterne und der sie umgebenden Scheibe aus Gas und Staub ist damit erst ansatzweise erklärt. Um diesem wichtigen Phänomen der Sternentstehung weiter nachzugehen, müssten sich detaillierte Beobachtungen im Infrarot sowie Spektraluntersuchungen anschließen. Sie würden weiteren Aufschluss über die Eigenschaften der Scheiben geben.

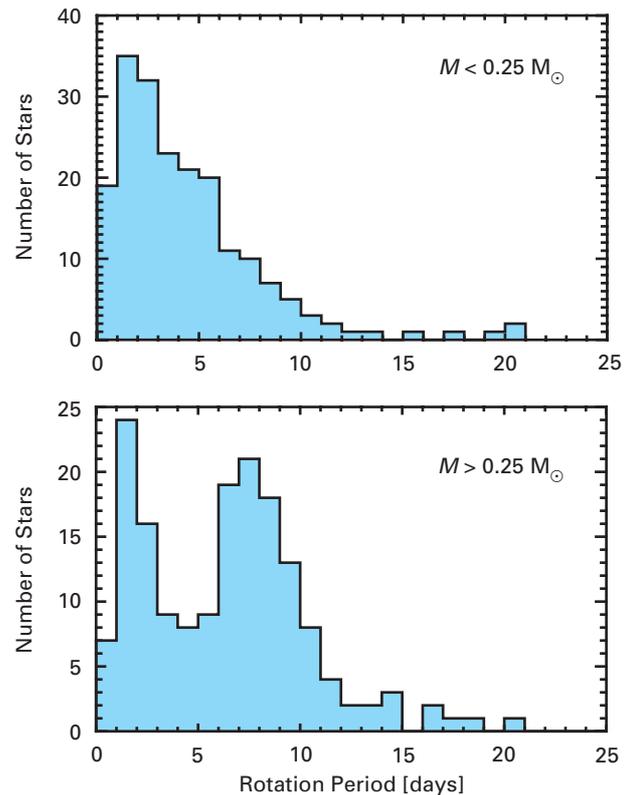


Abb. IV.6: Verteilung der Rotationsperioden von Sternen im Orion-Haufen mit Massen kleiner (oben) und größer (unten) als 0.25 Sonnenmassen.

Umlaufperioden und Massen junger Doppelsterne

Die Masse eines Sterns entscheidet über seinen inneren Aufbau und über seine Entwicklung. Gerade von jungen Sternen lässt sich diese wichtige Größe jedoch nur in wenigen Fällen direkt empirisch bestimmen. Überwiegend wird sie aus beobachteter Helligkeit und Farbe durch Vergleich mit einem Sternentwicklungsmodell gewonnen. Ein direkterer Weg geht über die Berechnung der Gesamtmasse zweier Sterne in einem Doppelsystem aus deren beobachteter Umlaufbahn. Einem Astronometeam aus Tautenburg, Kalifornien und dem MPIA ist es im Berichtsjahr gelungen, von einer größeren Zahl von T-Tauri-Sternen in Doppelsternsystemen die Abstände und Bewegungen zu messen. Die Daten erlauben bereits eine statistische Aussage über die Massen der einzelnen Komponenten der Sternpaare. Zukünftigen Beobachtungen ist es vorbehalten, die genauen Bahnparameter zu liefern.

T-Tauri-Sterne befinden sich in einem Vorhauptreihenstadium, das heißt sie haben das hydrostatische Gleichgewicht noch nicht erreicht, in dem sich beispielsweise unsere Sonne seit 4.6 Milliarden Jahren befindet. Die Astronomen kennen sehr viele T-Tauri-Sterne. Sie sind von unterschiedlichen charakteristischen Phänomenen

begleitet: Einige sind von großen Staubmengen umgeben, von einigen schießen eng gebündelte Teilchenstrahlen (Jets) in den Weltraum, wieder andere zeigen eine starke Röntgenaktivität. Ein Ziel der Astronomie besteht darin, diese Phänomene unterschiedlichen Entwicklungsphasen und Sternen mit unterschiedlichen Werten ihrer Massen zuzuordnen. Es existieren zwar eine Handvoll Massenbestimmungen junger Sterne aus Radialgeschwindigkeitsmessungen, doch in fast allen Fällen muss man zur Zeit noch theoretische Entwicklungswege in Abhängigkeit von der Masse im Computer berechnen und die ermittelten Farben und Leuchtkräfte beispielsweise in ein Hertzsprung-Russell-Diagramm eintragen. Auf diese Weise lässt sich aus den beobachteten Größen das Alter und die Masse der Sterne ableiten. Allerdings sind die Werte vom Modell abhängig, dessen Qualität sich nur schwer beurteilen lässt.

Es wäre daher äußerst wünschenswert, die Massen einer hinreichenden Zahl junger Sterne modellunabhängig zu bestimmen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Umlaufperioden und Abstände in Doppelsternen zu messen. Hieraus ergibt sich nach dem Newtonschen Gesetz die Systemmasse, also die Summe der Massen beider Komponenten. Eine Gruppe amerikanischer Astronomen publizierte erstmals 1995 für 20 T-Tauri-Doppelsysteme einen Durchschnittswert von 1.7 Sonnenmassen.

Die Astronomen des Instituts und Kollegen beobachteten in ähnlicher Weise, aber über einen längeren Zeitraum eine größere Zahl junger Doppelsterne im nahen Infrarot bei Wellenlängen von 1.25, 1.65 und 2.2 μm . Sie setzten hierfür die Technik der Speckle-Interferometrie am 3.5-Meter-Teleskop auf dem Calar Alto sowie am New Technology Telescope der ESO in Chile ein. Die am MPIA seit langem praktizierte Speckle-Technik ermöglicht es, die Luftunruhe zu umgehen, die es verhindert, sehr nahe beieinander stehende Sterne zu trennen. Diese Technik ist aus folgendem Grund unbedingt nötig. Über den verhältnismäßig kurzen zur Verfügung stehenden Zeitraum von wenigen Jahren lassen sich Umlaufbewegungen nur bei verhältnismäßig engen Doppelsternen nachweisen. Bei den beobachteten Sternen, die zwischen 450 und 620 Lichtjahre entfernt sind, dürfen die Komponenten nicht weiter als 0.5 Bogensekunden voneinander getrennt sein.

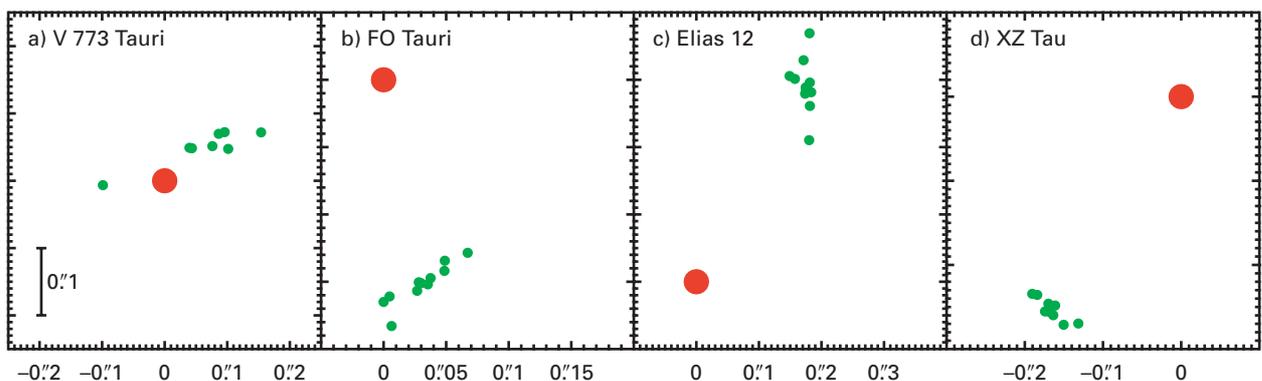
Auf normalen, lang belichteten Aufnahmen lassen sich die einzelnen Mitglieder nicht mehr auflösen, wohl aber mit Speckle-Interferometrie. Bei ihr belichtet man die Aufnahmen nur etwa eine Zehntel Sekunde lang und addiert sie später im Computer auf. Damit lässt sich die physikalisch best mögliche räumliche Auflösung (Beugungsgrenze) erreichen.

Bei der Datenauswertung wurden die aus den neuen Beobachtungen erhaltenen Sternpositionen von 34 Systemen mit vorhandenen Daten verglichen. Dies waren zum Teil die bereits 1995 von den amerikanischen Kollegen beobachteten T-Tauri-Sterne, zum Teil auch einige Systeme, die mit dem Weltraumteleskop HUBBLE beobachtet worden waren, zum überwiegenden Teil aber eigene, länger zurückliegende Beobachtungen. Die Zeitbasis betrug maximal zehn Jahre. Die Entfernungen ergaben sich aus Beobachtungen der entsprechenden Sternhaufen mit dem Astrometriesatelliten HIPPARCOS.

Aus dem Vergleich der älteren Aufnahmen mit den neuen ergaben sich dann die Geschwindigkeiten der Begleiter relativ zum jeweiligen Hauptstern (Abb. IV.7). Prinzipiell bestand bei den Beobachtungen die Möglichkeit, dass zwei auf der Sichtlinie nahe beieinander stehende Sterne tatsächlich weit hintereinander stehen und gar nicht physikalisch aneinander gebunden sind. Ein solcher Fall wurde mit hoher Wahrscheinlichkeit identifiziert und ausgeschlossen. Außerdem fand sich, dass die Begleitsterne in engen Systemen (Höchstabstand 25 Astronomische Einheiten) im Mittel höhere Geschwindigkeiten besaßen als in weiten, so wie man es aufgrund des Keplerschen Gesetzes erwarten würde (Abb. IV.8). Dies spricht dafür, dass es sich in allen Fällen um echte Doppelsterne handelt.

Dieses Datenmaterial reichte nun noch nicht aus, um die Umlaufperioden zu bestimmen. Zum einen sind die zeitlichen Abstände zwischen dem ersten und letzten Messpunkt zu kurz, und zum anderen messen die Astronomen nur die in der Himmelsebene liegende Bewegungskomponente. Es

Abb. IV.7: Beobachtete Bewegungen der Begleiter (grün) relativ zum jeweiligen Hauptstern (rot): **a)** V 773 (Bewegung entgegen dem Uhrzeigersinn, von rechts nach links), **b)** FO Tau (im Uhrzeigersinn, von links nach rechts), **c)** Elias 12 (im Uhrzeigersinn, von oben nach unten) und **d)** XZ Tau (im Uhrzeigersinn).



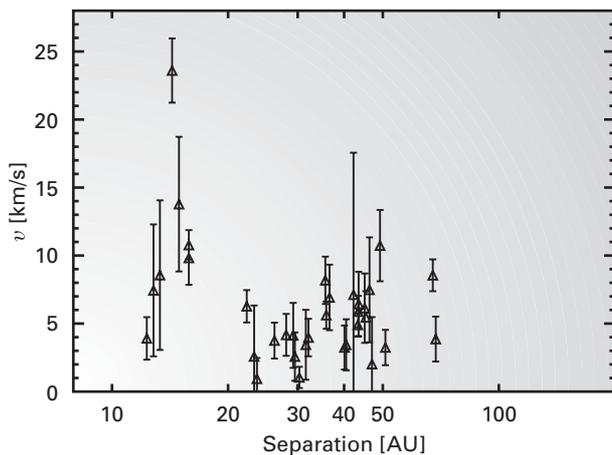


Abb. IV.8: Die Relativgeschwindigkeiten der Komponenten in Abhängigkeit vom gegenseitigen Abstand.

war aber bereits möglich, auf statistischem Wege einen mittleren Massenwert für alle Systeme zu berechnen. Bei dieser Prozedur geht man von dem Dritten Keplerschen Gesetz aus und zieht in Betracht, dass die Neigung der Bahnen gegen die Himmelsebene und die Exzentrizität der elliptischen Bahnen nicht bekannt sind.

Nun wurden im Computer zehn Millionen Doppelsysteme mit beobachteten Abständen zwischen 10 und 70 AE, einem weiten Exzentrizitätsbereich und Systemmassen zwischen 0.5 und 2.5 Sonnenmassen simuliert und mit beliebigen Neigungswinkeln im Raum verteilt. Aus dem Vergleich mit den Beobachtungsdaten ergab sich dann eine Durchschnittsmasse für alle Systeme von 2 ± 0.7 Sonnenmassen. Dieser Wert ist selbstverständlich nur ein Anhaltspunkt, da er für beide Komponenten der Paare die gleiche Masse voraussetzt. Dennoch ist ein erster Vergleich mit Modellen möglich, in denen die Sternmassen mithilfe von Sternentwicklungsmodellen ermittelt wurden. So hatten Theoretiker für die Sternentstehungsgebiete Taurus-Auriga und Scorpius-Taurus für die Einzelsterne Massenwerte zwischen 0.9 und 1.3 Sonnenmassen erhalten. Für diese Untergruppe finden die Astronomen des MPIA und Kollegen 1.2 ± 0.5 Sonnenmassen.

Damit stimmen die empirisch ermittelten Werte bereits recht gut mit denen der Theoretiker überein, wobei schon jetzt einzelnen Modellen der Vorzug gegeben werden konnte. Wenn mit weiteren Beobachtungen mehr Messpunkte hinzukommen und die Zeitbasis vergrößert werden kann, wird es möglich sein, für einzelne Systeme die Massen individuell zu bestimmen.

ISOPHOT beobachtet Sternentstehung in Dunkelwolken

Sterne entstehen tief verborgen im Innern dichter interstellarer Wolken aus Gas und Staub. Im sichtbaren Licht lassen sich daher die ersten Stadien der Sternentstehung nicht beobachten. Infrarotstrahlung vermag

jedoch den Staub zu durchdringen. Mit der am MPIA gebauten Kamera ISOPHOT auf dem Infrarotsatelliten ISO war es erstmals möglich, bei Wellenlängen bis zu 240 μm im Innern solcher Wolken jene extrem kalten Verdichtungen nachzuweisen, aus denen sich neue Sterne bilden.

Fertig gebildete Sterne sind in ihrem Innern viele Millionen Grad heiß. Am Beginn ihrer Entstehung sind sie aber die kältesten Objekte im Universum. Dies hat folgenden Grund. Die äußeren Bereiche interstellarer Staubwolken werden durch das allgemein vorhandene Sternlicht erwärmt. Vor allem der ultravioletten und der blauen Anteil des Lichts sind hierfür verantwortlich. Diese Strahlung kann jedoch nicht tief in die Wolke eindringen. Damit sind die innersten Bereiche vor der wärmenden Sternstrahlung geschützt und kühlen sich sehr stark ab.

Wird in einem Gebiet eine kritische Dichte überschritten, so zieht sich dieser Bereich unter dem Einfluss der Schwerkraft zusammen. Erst wenn dieses Stadium erreicht ist, erwärmt sich die Materie langsam durch die Kontraktion und die damit verbundene Erhöhung des Druckes, bis schließlich im Zentrum einer Wolke Temperaturen von einigen Millionen Grad herrschen. Dann setzt Kernfusion ein, und der Stern ist entstanden. In diesem Stadium haben die Sterne häufig die sie umgebende Staubwolke aufgelöst und sind nun auch im sichtbaren Licht erkennbar.

Der Prozess der Sternentstehung lässt sich über weite Bereiche durch Beobachtungen studieren. Die ersten Stadien aber, in denen die Verdichtungen noch sehr kalt sind, blieben den Beobachtern bisher weitgehend verborgen. Lediglich im Radiobereich ließen sich Moleküle in mutmaßlichen prästellaren Wolkenkernen nachweisen. ISOPHOT eignet sich hervorragend, diese ersten Verdichtungen im Innern von Staubwolken nachzuweisen.

ISOPHOT war eines von vier wissenschaftlichen Instrumenten an Bord des europäischen Weltraumteleskops ISO, mit dem etwa 29 Monate lang bis zum April 1998 ausgewählte Objekte am Himmel beobachtet wurden. Das unter der Leitung des MPIA entstandene ISOPHOT arbeitete als Photopolarimeter, Kamera und Spektrophotometer im Wellenlängenbereich von 2.5 μm bis 240 μm . Damit konnte ISOPHOT Wärmestrahlung von Staub bei Temperaturen bis herunter zu etwa 11 Kelvin nachweisen.

Sternentstehung im Chamäleon-Komplex

Am Südhimmel im Sternbild Chamäleon gibt es ein ausgedehntes Gebiet dichter Molekülwolken. Drei besonders ausgeprägte Verdichtungen werden mit Cha I, Cha II und Cha III bezeichnet. Beobachtungen im Radiobereich hatten bereits auf Sternentstehungsprozesse im Innern dieses Dunkelwolkengebietes hingewiesen. Da es nur etwa 500 Lichtjahre entfernt ist, bestand die Chance, die prästellaren Kerne in den Dunkelwolken räumlich aufzulösen. Sie

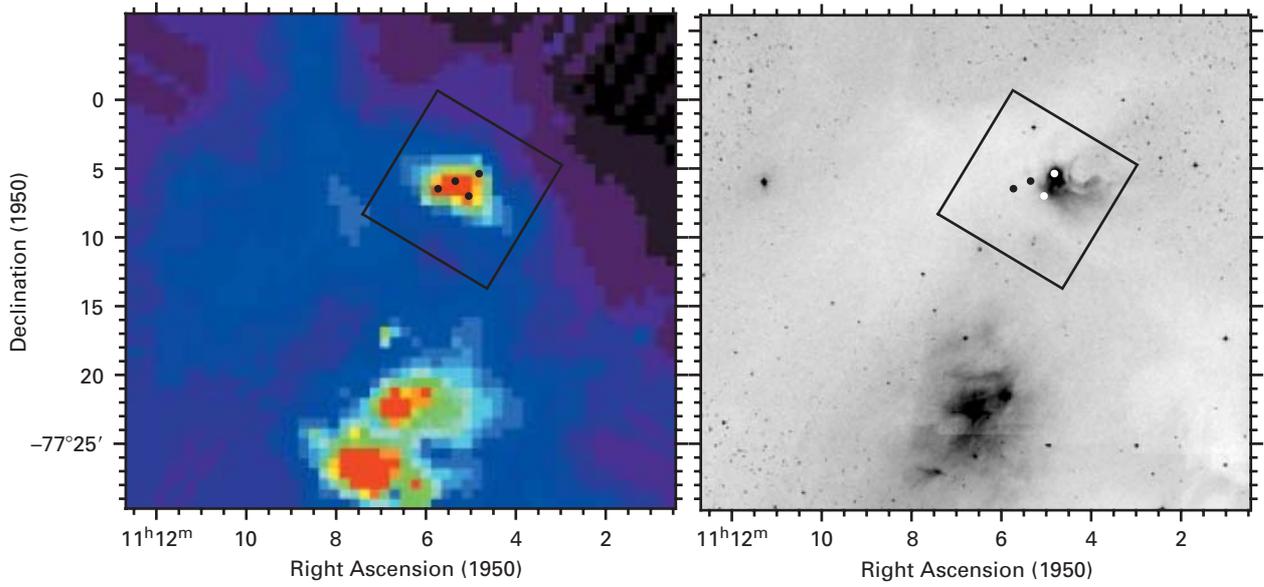


Abb. IV.9: Das Gebiet Chamäleon I, links aufgenommen mit ISOPHOT bei 100 μm Wellenlänge, rechts im sichtbaren Bereich.

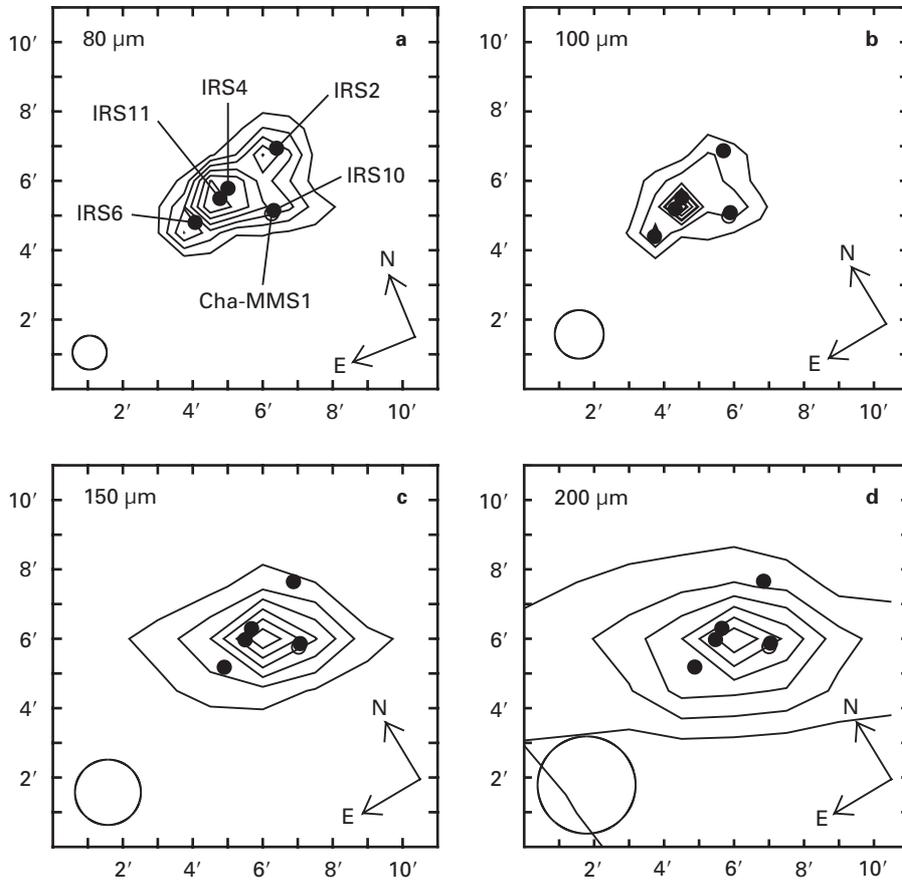
menarbeit mit Kollegen am MPIA den Chamäleon-Komplex eingehend studierten.

haben Ausdehnungen um 0.7 Lichtjahre, was etwa 5 Bogenminuten am Himmel entspricht.

In einer Arbeit beschäftigten sie sich ausschließlich mit dem Teilkomplex Chamäleon I. Hier hatte schon 1946 der

Im Berichtsjahr erschienen gleich zwei Arbeiten, in denen finnische und ungarische Astronomen in Zusam-

Abb. IV.10: Die Infrarotquellen in Cederblad 110, aufgenommen mit ISOPHOT bei vier Wellenlängen.



Astronom Cederblad drei nach ihm benannte Reflexionsnebel entdeckt. Einer davon, Cederblad 110, wird von einem T-Tauri-Stern beleuchtet (Abb. IV.9). Er ist wie unsere Sonne vom Spektraltyp G, jedoch erst etwa eine Million Jahre alt. Mit dem Infrarotteleskop IRAS ließen sich in den 80er Jahren bereits drei Quellen in Cederblad 110 ausmachen, von denen die eine der T-Tauri-Stern ist. Sie erhielten die Bezeichnungen IRS 2 (der T-Tauri-Stern), IRS 4 und IRS 6. IRS 4 und IRS 6 waren nur im Infrarot beobachtbar. Allerdings liegt das Maximum ihrer Emission noch jenseits der IRAS-Nachweisgrenze von $100\ \mu\text{m}$ Wellenlänge. Weitergehende Aussagen über den Entwicklungsstatus dieser Objekte waren daher nur ansatzweise möglich. Bei Radiobeobachtungen zeigte sich zudem südlich von IRS 2 und IRS 4 ein Objekt, genannt Cha-MMS 1, von dem eine Strömung molekularen Gases auszugehen scheint. Ein Phänomen, das häufig bei jungen Sternen beobachtet wird.

Mit ISOPHOT konnten IRS 2, 4 und 6 jenseits von $80\ \mu\text{m}$ nachgewiesen werden, wobei die räumliche Auflösung der Kamera bei $200\ \mu\text{m}$ nicht mehr ausreichte, um die Quellen zu trennen. Bei $80\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ ließ sich auch Cha-MMS1 nachweisen. Diese Quelle erhielt die zusätzliche Bezeichnung IRS 10 (Abb. IV.10).

Diese vier Quellen liegen in einem ausgedehnten Gebiet, das Infrarotstrahlung abgibt. Diese flächenhafte Emission und die vier Punktquellen wurden im Computer von dem Bild abgezogen. Übrig blieb eine schwache Quelle zwischen IRS 4 und IRS 6. Sie erhielt die Bezeichnung IRS 11. Sie ließ sich jedoch nur bei $80\ \mu\text{m}$ nachweisen. Bei größeren Wellenlängen reichte die räumliche Auflösung nicht mehr aus. Ein anderes Astronomenteam hatte jedoch mit der Infrarotkamera ISOCAM auf ISO ebenfalls die Region Chamäleon I beobachtet und dabei bei $7\ \mu\text{m}$ und $14\ \mu\text{m}$ Wellenlänge fast genau an der Stelle von IRS 11 eine Quelle gefunden. Mit großer Wahrscheinlichkeit handelt es sich bei beiden Beobachtungen um das selbe Objekt.

Damit sind jetzt insgesamt fünf Quellen in Cederblad 110 bekannt: IRS 2, 4, 6, 10 und 11. Interessant ist nun die Frage, in welchem Entwicklungszustand sich diese befinden. Die entscheidenden Hinweise hierauf liefert die Energieverteilung der von den Quellen emittierten Strahlung, und die ließ sich erst mit ISOPHOT komplett erschließen, weil die Quellen ihr Strahlungsmaximum jenseits von $100\ \mu\text{m}$ haben (Abb. IV.11). Wie aus der Abbildung ersichtlich, lässt sich die Emission im fernen Infrarot relativ gut mit Planck-Kurven für die Strahlung Schwarzer Körper anpassen. Daraus ergeben sich für den Staub Temperaturen zwischen $20\ \text{K}$ und $25\ \text{K}$. Aus dem gesamten Spektrum leiteten sich dann die Gesamtleuchtkräfte ab. Sie variieren stark und liegen zwischen dem 0.4- und 3.4-fachen der Sonnenleuchtkraft. Damit müssen die Körper auch unterschiedliche Temperaturen besitzen. Je stärker die Energieverteilung in Abb. IV.11 zu kürzeren Wellenlängen hin ansteigt, desto heißer ist das Objekt. Modellrechnungen ergaben Temperaturwerte von 2700 , 260 , 72 und $19\ \text{K}$ für die Quellen IRS 2, 6, 4 und 10.

Offensichtlich sind also die Körper unterschiedlich alt. Möglicherweise haben sie sich in zwei Phasen gebildet. Zuerst entstand vor einer Million Jahren die Quelle IRS 2, die jetzt den Reflexionsnebel Cederblad 110 aufleuchten lässt. Die vier anderen Quellen hingegen sind höchstens $100\ 000$ Jahre alt. Es ist denkbar, dass IRS 2 die Entstehung der jüngeren Körper ausgelöst hat.

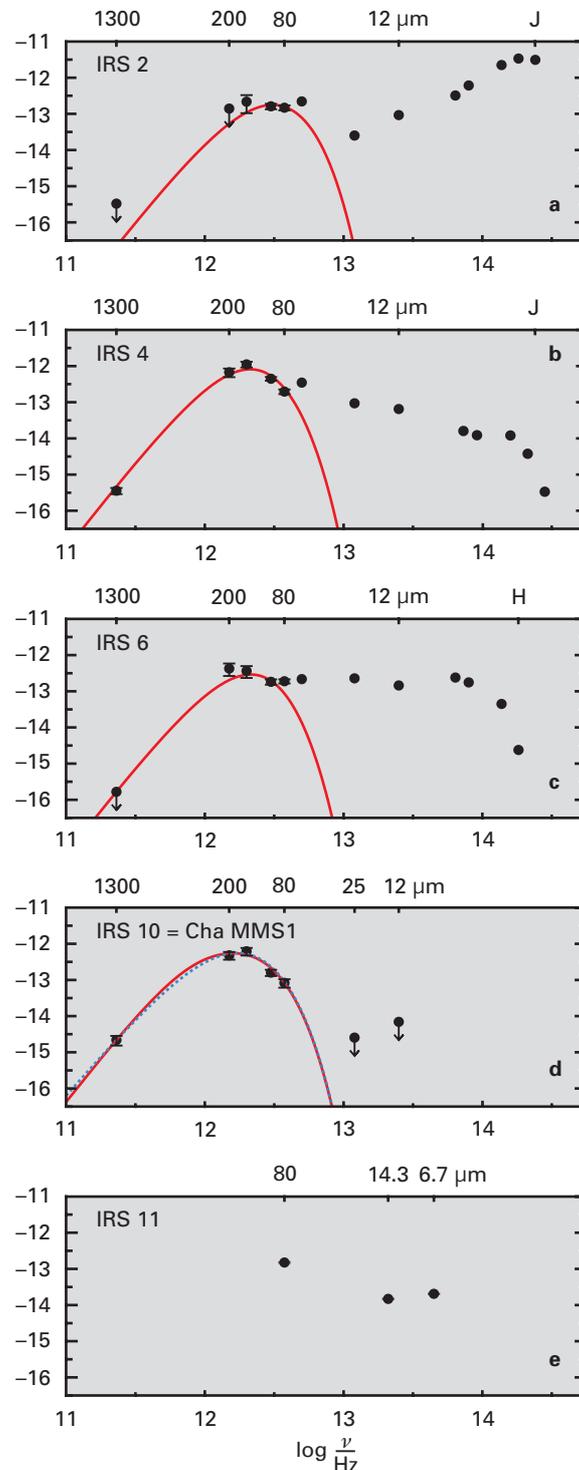


Abb. IV.11: Die spektralen Energieverteilungen der Infrarotquellen in Cederblad 110.

Eine Sonderstellung nimmt das kühlfte Objekt IRS 10 ein. Es gehört sehr wahrscheinlich zu den wenigen bekannten echten Protosternen. Das sind Objekte, die bereits kontrahieren, dabei noch Materie aus der Umgebung aufsammeln und in ihrem Innern noch keine Fusion gezündet haben. Sie zeigen als typische Indizien:

- Nachweisbarkeit erst bei Wellenlängen oberhalb von $10\ \mu\text{m}$,
- Temperaturen zwischen 15 und 30 K,
- Aktivität wie etwa molekulare Gasausflüsse, beobachtbar vor allem in der Emissionslinie des CO, und
- mindestens 2 % der Gesamtemission bei Wellenlängen oberhalb von $350\ \mu\text{m}$.

Alle Kriterien treffen auf IRS 10 zu. Offenbar handelt es sich um einen kleinen Protostern von etwa einer halben Sonnenmasse.

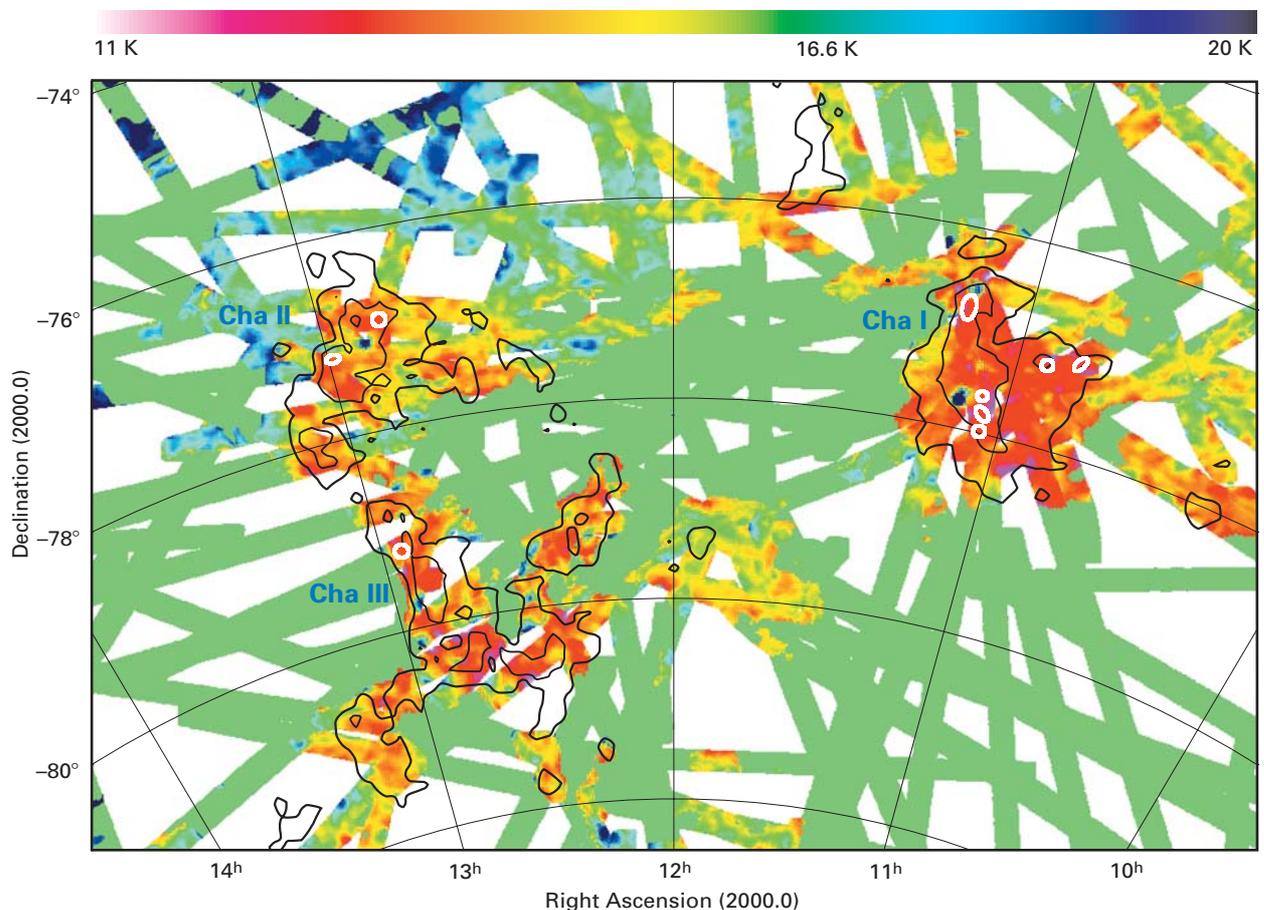
Die Ferninfrarotbeobachtungen mit ISOPHOT und im Submillimeterbereich erlaubten es auch, die Massen der Sterne und der Wolke abzuschätzen. Für die gesamte Wolke Cederblad 110 ergaben sich 15 bis 19 Sonnenmassen, die Sterne besitzen zusammen 3 bis 4 Sonnenmassen. Daraus ergibt sich, dass die anfängliche Materie der Dunkelwolke zu 16 bis 21 % in Sterne umgewandelt wurde. Dieser Wert liegt weit oberhalb der 2 bis 9 %, die für Taurus-Auriga, ein großes Sternentstehungsgebiet am

Nordhimmel, ermittelt wurde. Er entspricht aber etwa demjenigen in der Rho-Ophiuchi-Wolke. Die Ursachen für diese Unterschiede sind nicht klar. Sie stehen aber vermutlich in Verbindung mit stark voneinander abweichenden Werten der Sternsdichte: In Cederblad 110 ist sie rund 1500-mal höher als im Taurus-Auriga-Gebiet.

Der Chamäleon-Komplex in der ISO-Zufallsdurchmusterung

Eine zweite Möglichkeit, das Sternentstehungsgebiet im Chamäleon zu beobachten ergab sich im Rahmen der Zufallsdurchmusterung mit ISO. Sie hat folgenden Hintergrund. Da ISO auf einzelne Objekte ausgerichtet wurde, musste das Instrument zwischen den Beobachtungen von einer Himmelsposition zur nächsten geschwenkt werden. Um diese Phase nicht ungenutzt zu lassen, blieb die Kamera C200 in ISOPHOT während der Schwenks angeschaltet. Dadurch ergaben sich eindimensionale Scans über den gesamten Himmel in dem bis zur ISO-Mission noch unerforschten fernen Infrarotbereich um $200\ \mu\text{m}$ Wellenlänge. Auf diese Weise konnten noch einmal etwa 15 % des

Abb. IV.12: Farbtemperaturkarte des Chamäleon-Gebietes aus der Zufallsdurchmusterung.



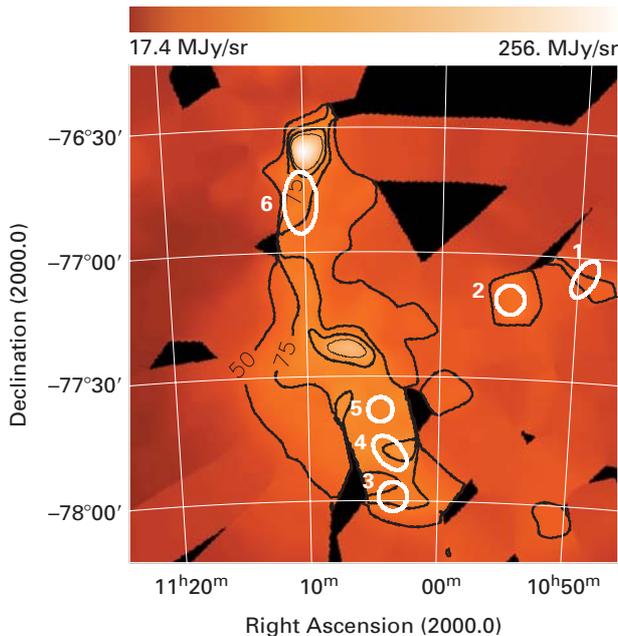


Abb. IV.13: Chamäleon I bei 170 μm . Die weiß eingekreisten Bereiche kennzeichnen die »kalten Knoten«.

gesamten Himmels in 3 Bogenminuten breiten Streifen durchmustert werden.

Ein insgesamt 20 mal 20 Quadratgrad großes Gebiet in den Sternbildern Chamäleon und Fliege (Musca) wurde sehr häufig von dem „Fahrstrahl“ überquert, so dass insgesamt etwa ein Viertel des Molekülwolkenkomplexes in Chamäleon kartiert wurde. Diese bei 170 μm Wellenlänge gewonnenen Daten wurden mit bei 100 μm gewonnenen IRAS-Daten verglichen. Die interessanten kühlen Gebiete heben sich durch ein großes Intensitätsverhältnis $I(170 \mu\text{m})/I(100 \mu\text{m})$ hervor.

Das Ergebnis dieses Vergleiches ist eine Farbtemperaturkarte der drei großen Komplexe Chamäleon I, II und III (Abb. IV.12). Sie zeigt überwiegend kalte Bereiche mit Temperaturen unterhalb von 15 K. Nur wenige „warme“ Gebiete mit bis zu 20 K erscheinen im nordöstlichen Teil. Das diffus verteilte Material zwischen den großen Wolkenkomplexen weist Temperaturen um 16 K auf. Das ist auch jener Bereich, den man für Staub erwartet, der von diffusem Licht umgebender Sterne erwärmt wird.

Daneben zeigen sich sehr kalte Bereiche mit Temperaturen bis herunter zu 12 K. Dies sind ausschließlich kleine Strukturen im Innern der Wolken. Insgesamt fanden die Astronomen neun dieser kalten Bereiche, wovon allein sechs in Chamäleon I liegen (Abb. IV.13). Zwei davon stimmen mit den im vorigen Abschnitt beschriebenen kalten Wolken überein. Auch die in beiden Arbeiten ermittelten Temperaturen von 13.7 K sind im Rahmen der Ungenauigkeit von 0.5 K identisch: ein Beleg für die Effizienz der Suche nach kalten Quellen mit Hilfe der ISO-Zufallsdurchmusterung.

Um mehr über diese interessanten Gebilde zu erfahren, verglichen die Astronomen ihre Ergebnisse mit denen

anderer Autoren. Dabei zeigte sich, dass die kalten Knoten mit Bereichen besonders starker Staubabsorption (Extinktion) im Bereich des sichtbaren Lichts übereinstimmen. Es ließ sich sogar ein linearer Zusammenhang zwischen der Intensität der Ferninfrarotstrahlung bei 170 μm (kalter Staub) und der Extinktion herstellen – ein deutliches Anzeichen dafür, dass die Strahlung bei 170 μm von größeren Staubteilchen stammt, die auch für die optische Extinktion verantwortlich sind. Damit geben die Ferninfrarotkarten offenbar immer sehr gut die Dichteverteilung des Staubes im Innern der Wolken wieder. Schließlich befinden sich die kalten Bereiche an Stellen, wo japanische Astronomen 1998 hohe Konzentrationen des Gases CO gefunden hatten.

Aus all dem folgt der eindeutige Schluss: Bei den kalten Bereichen handelt es sich um Verdichtungen im Innern der Chamäleon-Wolken. Die aus den Beobachtungen abgeleitete Gasdichte beträgt etwa 10^4 Wasserstoffmoleküle pro Kubikzentimeter in Knoten mit Ausdehnungen von etwa 0.7 Lj. In welchem Stadium sich diese Wolkenkerne befinden (prästellare Wolken kurz vor oder während des Kollapses), müssen weitere Beobachtungen zum Beispiel im Submillimeter-Bereich zeigen. Sie sind bereits angelaufen.

Isolierte Sternentstehung in Barnard 217

Bei den Schwenks überquerte ISOs Sehstrahl auch dreimal die Dunkelwolke Barnard 217 (B 217, s. Abb. IV.14). Damit ergab sich die Gelegenheit, diese kleine Dunkelwolke erstmals im Ferninfrarot zu studieren. B 217 liegt am Ende eines lang gestreckten Staubbandes im Taurus-Molekülwolkenkomplex. Die Dunkelwolke ist etwa 450 Lichtjahre entfernt und mit einer Ausdehnung von 2 mal 1.3 Lichtjahren ($15'$ mal $10'$ am Himmel) recht klein. Im Innern solcher Wolken könnten einzelne Sterne entstehen, weswegen die Wolke schon des öfteren Ziel astronomischer Beobachtungen war. Diese hatten ergeben, dass B 217 tatsächlich aus zwei Kondensationen etwa gleicher Größe besteht. Entsprechend ihrer Lage werden sie mit B 217 SW (Südwest) und B 217 NE (Nordost) bezeichnet. IRAS hatte zwischen diesen beiden Verdichtungen eine Infrarotquelle auffindig gemacht – einen jungen Stern, der einen Reflexionsnebel beleuchtet. Dieser Nebel ist senkrecht zu der Verbindungslinie zwischen B 217 SE und B 217 NW ausgerichtet und hat eine kometarische Form, wie man sie bei jungen Sternen häufig sieht.

Damit ist B 217 zwar ein Gebiet aktiver Sternentstehung, der physikalische Zustand der beiden Kondensationen war indes unklar. Aus den Messungen mit ISOPHOT bei 170 μm und den vorhandenen IRAS-Daten ergaben sich Staubtemperaturen von 12 K und 11 K für die beiden Teilwolken. Diese ungewöhnlich niedrigen Temperaturen deuten erneut auf sehr dichte Wolkenkerne hin. Überraschenderweise fand sich in den ISO-Daten eine weitere Quelle etwa $3'$ nordwestlich von B 217 SW. Dieses mit B 217 NW (Nordwest) bezeichnete Gebiet ist mit 13.3 K etwas wär-

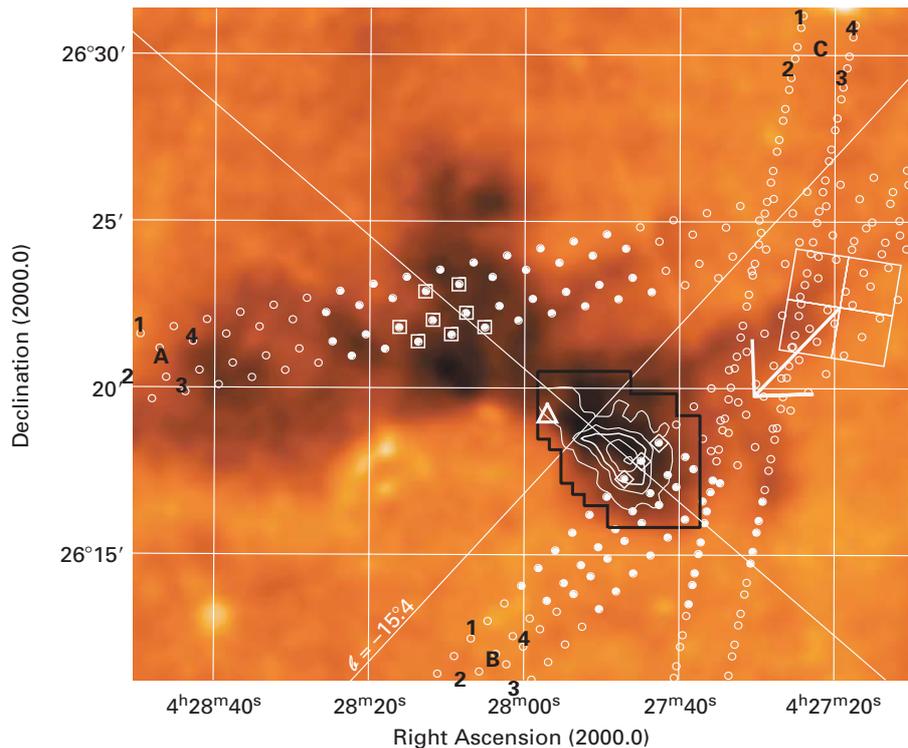


Abb. IV.14: B 217 erscheint auf Bildern im sichtbaren Bereich als dunkler Fleck. Das Gebiet wurde von ISO im Zufallsmodus dreimal überquert (A, B, C).

mer als die beiden anderen Verdichtungen. Aus den Intensitäten bei $170 \mu\text{m}$ ergaben sich für die Massen der drei Kerne Werte von 1.5, 2.6 und 3.8 Sonnenmassen.

Um über das Gas in B 217 mehr zu erfahren, beobachteten die Astronomen zusammen mit einem Kollegen aus Italien den Kern B 217 SW auch mit dem 100-m-Radioteleskop des MPI für Radioastronomie in Effelsberg. Hiermit wiesen sie das Ammoniak-Molekül (NH_3) nach, das ein guter Dichteindikator ist. Nachdem NH_3 schon zuvor in B 217 gefunden worden war, konnten die Astronomen des MPIA und Kollegen dieses Molekül nun in dem kalten Gebiet so deutlich nachweisen, dass sich Temperatur und Dichte bestimmen ließen. Es war sogar möglich, ein Dichteprofil innerhalb des Knotens zu ermitteln. Demnach fällt die (umgerechnete) H_2 -Dichte von mindestens $3 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ im Zentrum exponentiell bis auf $6 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$ am Rand ab (Abb. IV.15). Die kinetische Temperatur, welche die thermische Bewegung des Gases beschreibt, steigt von etwa 9 K im Zentrum linear bis auf 12 K am Rand hin an (Gas- und Staub haben nicht die selbe Temperatur). Hiermit lassen sich die potentielle und thermische Energie des Gases abschätzen. Das Ergebnis, wonach die potentielle Energie etwa doppelt so groß ist wie die thermische, deutet darauf hin, dass dieses Gebiet nahe am hydrostatischen Gleichgewicht ist. Das heißt, der Kollaps könnte jederzeit einsetzen. Das Selbe scheint auch auf den anderen kalten Knoten in B 217 NE zuzutreffen.

Die neuen Beobachtungen zeigen die kleine Dunkelwolke B 217 also in einem sehr dynamischen Zustand. Während gerade ein Stern (der T-Tauri-Stern) darin entsteht, finden sich zwei oder drei Staubverdichtungen, die sich zukünftig zu neuen Sternen zusammenziehen werden oder gerade dabei sind. Ähnlich wie bei Cederblad 110 findet man auch in B 217 zwei Phasen der Sternentstehung, die einander offenbar nicht stören. Interessanterweise liegen die beiden dominanten Staubklumpungen in B 217 senkrecht zu der Längsachse des kometarischen Nebels, den der junge Stern beleuchtet. In vergleichbaren Fällen ist ein solcher Reflexionsnebel mit einem bipolaren Gasausstrom in Richtung der Längsachse verbunden. Und diese stimmt wahrscheinlich mit der Rotationsachse des Sterns überein.

Diese Arbeiten demonstrieren das große Potenzial der ISO-Zufallsdurchmusterung: Nachdem Astronomen des

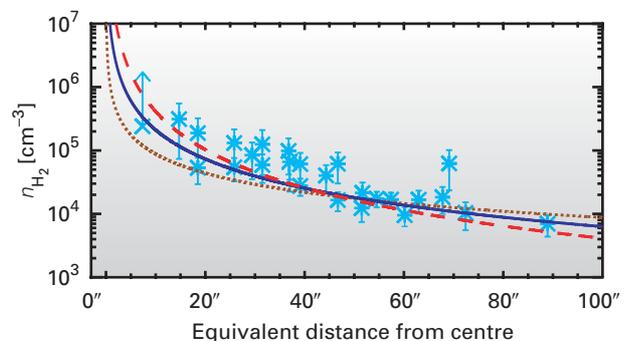


Abb. IV.15: Radiale Dichteverteilung in B 217. Die gepunkteten, durchgezogenen und gestrichelten Kurven geben exponentielle Verläufe mit den Exponenten -1, -1.5 und -2 wieder.

Instituts auf diese Weise kalten Staub in anderen Galaxien finden konnten, machten sie nun auch kalte Bereiche im Innern von Molekülwolken in unserer Milchstraße ausfindig. Die Astronomen des MPIA sind zuversichtlich, in der Milchstraße bis zu hundert dieser jungen Sternentstehungsgebiete zu finden. Sie werden dann die Basis für weitere Beobachtungen bilden, sowohl schon jetzt im Submillimeter- und Millimeterbereich als auch später mit zukünftigen Weltraumteleskopen im Ferninfrarot.

Palomar 5 – ein Kugelsternhaufen in der Auflösung

Die Astronomen kennen in unserem Milchstraßensystem zur Zeit etwa 150 Kugelsternhaufen. Sie bewegen sich in unterschiedlichen Abständen und auf unterschiedlichen Bahnen um das Galaktische Zentrum, wobei sie immer wieder die Milchstraßenebene durchqueren. Bei jeder dieser Passagen verlieren sie einige Mitglieder, das heißt, sie lösen sich langsam auf. Man erwartet, dass die Stärke dieses Effekts von der Masse und Kompaktheit der Kugelsternhaufen sowie von ihrem Abstand vom Milchstraßenzentrum abhängt. Der beobachterische Nachweis dieses Auflösungsprozesses ist schwierig, da die Verluste an Haufensternen im Allgemeinen klein sind und man einen großen Himmelsbereich um die Kugelsternhaufen herum untersuchen muss. Einem Team von Astronomen am MPIA und in den USA gelang der direkte Nachweis kürzlich erstmals bei dem Kugelsternhaufen Palomar 5. Dieses System zeigt zwei ausgeprägte »Schweife« von Sternen, die aus ihrem Verband herausgerissen wurden.

Kugelsternhaufen beinhalten zwischen zehntausend und einige Millionen Sterne und weisen Durchmesser zwischen 40 und 400 Lichtjahren auf. Die Sterndichte nimmt im Allgemeinen zum Zentrum hin stark zu und kann dort bis zu zehntausendmal größer sein als in der Sonnenumgebung.

Die galaktischen Kugelsternhaufen befinden sich in einem ausgedehnten Halo von über 300 000 Lichtjahren Durchmesser und bewegen sich auf elliptischen Bahnen um das galaktische Zentrum. Man geht davon aus, dass sie entstanden sind, als sich riesige primordiale Gaswolken durch die Schwerkraft zu rotierenden Galaxien zusammenzogen. In dieser ersten Phase bildeten sich die Kugelsternhaufen. In einer späteren Phase flachte die Wolke des restlichen Gases aufgrund der Zentrifugalkraft zu einer Scheibe ab. In dieser Scheibe bildeten sich weitere Sternpopulationen der Milchstraßenebene, denen auch die Sonne angehört.

Im Laufe der vergangenen rund zwölf Milliarden Jahre haben sich die Kugelsternhaufen durch eine Reihe von Prozessen verändert. Hierzu hat vor allem das Schwerkraftfeld der Milchstraße entscheidend beigetragen. Da sich die Kugelsternhaufen mit Perioden von einigen hun-

dert Millionen Jahren auf elliptischen und meist stark gegen die galaktische Scheibe geneigten Bahnen um das Galaktische Zentrum bewegen, wirken auf sie erhebliche, zeitlich wechselnde Gezeitenkräfte ein. Durch diese Gezeitenkräfte wird den Sternen in den Kugelsternhaufen Energie zugeführt, wodurch sich ihre Bahnen innerhalb der Sternhaufen verändern. Für einige Sterne hat das zur Folge, dass sie sich aus dem unmittelbaren Schwerefeld des Haufens herausbewegen in weiter vom Haufenzentrum entfernte Bereiche, wo die Schwerkraft des Milchstraßensystems überwiegt. Dies führt schließlich zur Entstehung von symmetrischen Schweifen aus Sternen, die nicht mehr an den Kugelsternhaufen gebunden sind, aber seiner Bahn noch folgen.

Computersimulationen haben ergeben, dass sich auf diese Weise die Hälfte der heutigen Kugelsternhaufen innerhalb der nächsten zehn Milliarden Jahre auflösen wird. Dementsprechend sollte man erwarten, auch gegenwärtig Sternhaufen beobachten zu können, die sich im Zustand fortgeschrittener Auflösung befinden. Dies sollte sich in Gezeitenschweifen entlang der Bahn manifestieren. Die Suche nach derartigen Strukturen erfordert indes ein großes Bildfeld, so dass bei den ersten Untersuchungen hierzu fotografische Aufnahmen verwendet wurden. Aufgrund der inhomogenen Empfindlichkeit und relativ geringen Auflösung der Fotoplatten wurden reale Gezeitenschweife dabei nur ansatzweise sichtbar.

Eine neue Möglichkeit ergab sich für die Wissenschaftler am MPIA kürzlich durch den »SLOAN Digital Sky Survey« (SDSS). Dies ist die bislang umfangreichste Himmelsdurchmusterung, bei der etwa ein Viertel des gesamten Himmels mit einer Mosaik-CCD-Kamera 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. Das Projekt wird von einem internationalen Konsortium amerikanischer, japanischer und deutscher Institute durchgeführt. Die beteiligten deutschen Forschungseinrichtungen sind das Heidelberger MPIA und das MPI für Astrophysik in Garching. 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.

Bereits in der Testphase der SLOAN-Himmelsdurchmusterung wurde ein Bereich aufgenommen, in dem sich der 75 000 Lj entfernte Kugelsternhaufen Palomar 5 befindet. Dieser Haufen ist wegen seiner ungewöhnlichen Eigenschaften ein besonders interessantes Forschungsobjekt. Mit einer Masse von 13 000 Sonnenmassen und einem im Vergleich hierzu großen Kernradius von 65 Lj gehört er zu den masseärmsten der derzeit existierenden galaktischen Kugelsternhaufen mit einer sehr geringen

zentralen Verdichtung (Abb. IV.16). Damit war er ein Kandidat für einen in der Auflösungsphase befindlichen Haufen.

Mit Hilfe der Daten der Sloan-Durchmusterung wurde ein sechs mal drei Grad großes Himmelsareal um den Haufen untersucht. Darin befinden sich sowohl Sterne des Haufens als auch eine Vielzahl von Feldsternen der Milchstraße, die nicht mit Palomar 5 assoziiert sind. Darüber hinaus enthält dieses Gebiet eine große Zahl von Hintergrundgalaxien. Um die räumliche Verteilung der Haufensterne in Gänze sichtbar werden zu lassen, musste also zunächst eine Methode gefunden werden, mit der sich die Vordergrundsterne von den Sternen des Haufens trennen lassen. Hierzu bot sich Photometrie in den fünf Filterbereichen des SDSS an.

Zunächst wurden alle Sterne, die von der Erde aus gesehen im Zentralbereich des Haufens liegen und daher mehrheitlich Haufensterne sind, in ein Farben-Helligkeits-Diagramm eingetragen. Das selbe wurde dann mit Sternen

gemacht, die weitab vom Haufen stehen und daher mehrheitlich die Population der Vordergrundsterne charakterisieren. Die Galaxien konnten entweder aufgrund ihrer ausgedehnten Struktur oder aber aufgrund ihrer von den Haufensternen abweichenden Farben eliminiert werden. Durch einen statistischen Vergleich der beiden beobachteten Verteilungen im Farben-Helligkeits-Diagramm konnte derjenige Bereich bestimmt werden, der für die Auswahl von Haufensternen am besten geeignet ist.

Dies wird in Abb. IV.17 verdeutlicht. Die beiden linken Diagramme zeigen die Farben und Helligkeiten aller Sterne innerhalb von 3 Bogenminuten um das Zentrum des Kugelsternhaufens (cluster core) in zwei speziell auf die

Abb. IV.16: Mehrfarbenkompositaufnahme von Palomar 5 aus dem Sloan Digital Sky Survey. Die locker verteilten Sterne dieses Haufens erscheinen in gelblicher und blauer Farbe. Es handelt sich vorwiegend um Unterriesen und Hauptreihensterne.



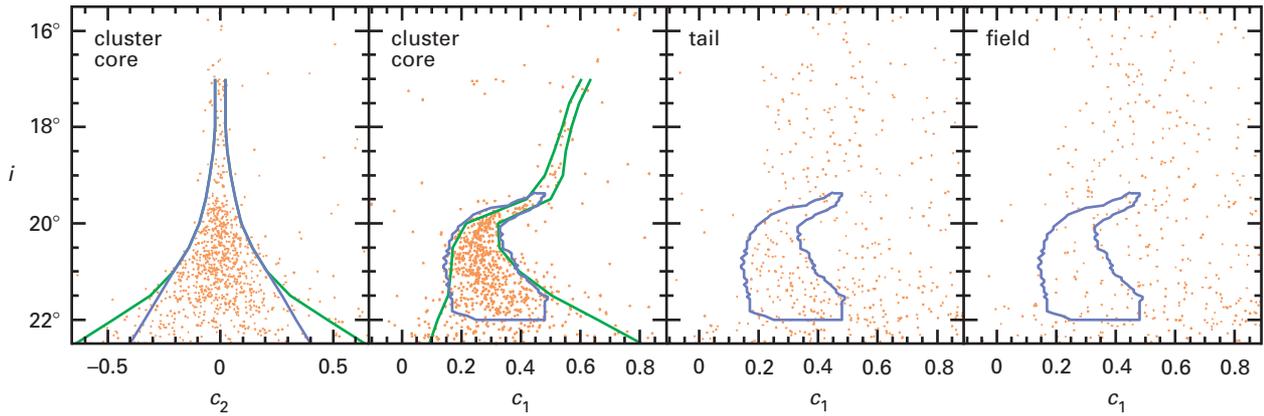


Abb. IV.17: Farben-Helligkeits-Diagramme der Sterne in (cluster core) und um (field) Palomar 5. Die zu dem Kugelsternhaufen gehörenden Sterne liegen überwiegend innerhalb des durch eine violette Linie gekennzeichneten Bereichs. Hier machen sich auch die Sterne im Schweif (tail, zweites Diagramm von rechts) bemerkbar.

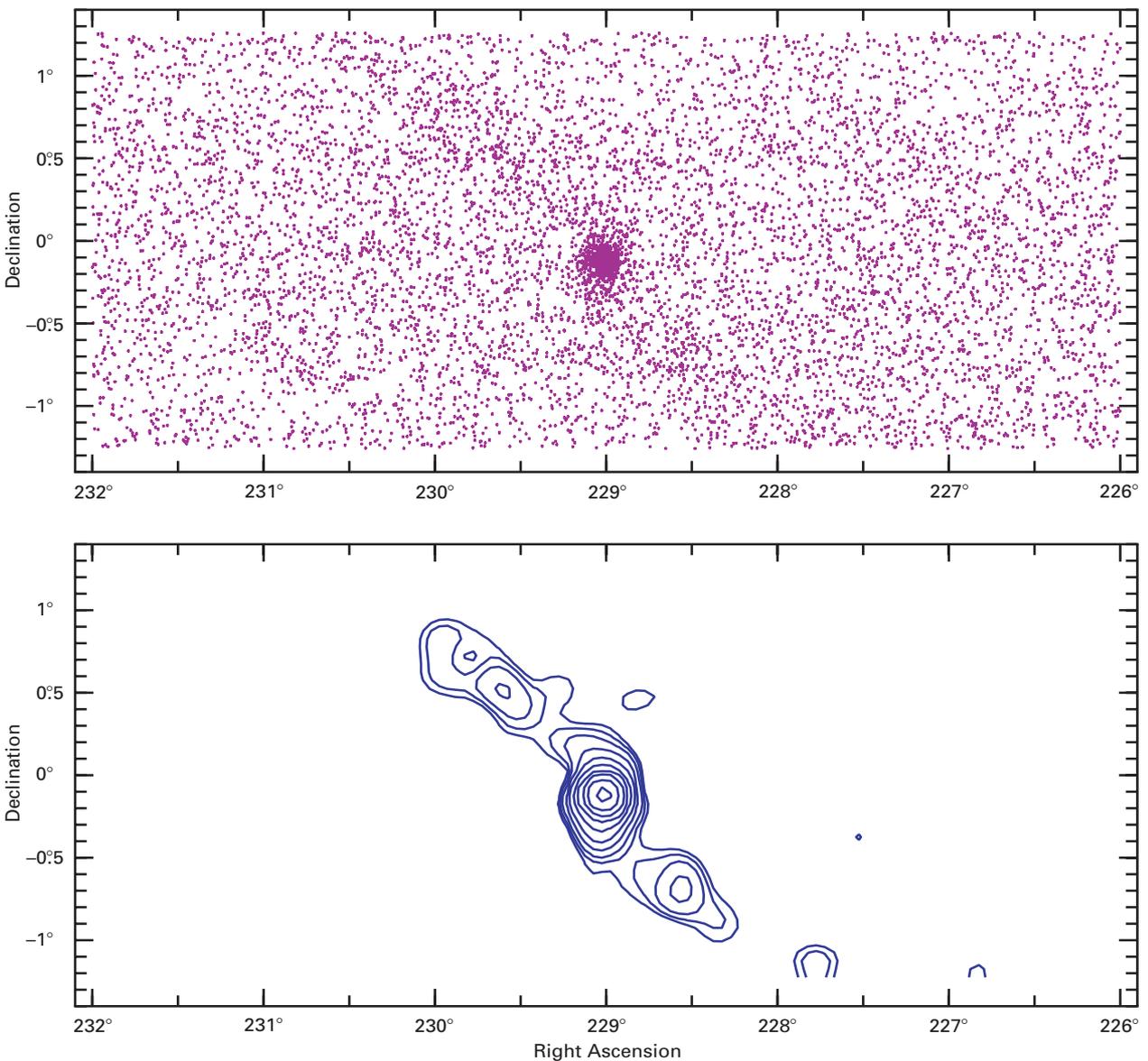


Abb. IV.18: Die Verteilung der photometrisch dem Haufen ähnlichen (oben). Der Konturplott (unten) zeigt die zugehörigen Linien gleicher Vordergrundssterne und der echten Mitglieder von Palomar 5 (Flächendichte der Sterne).

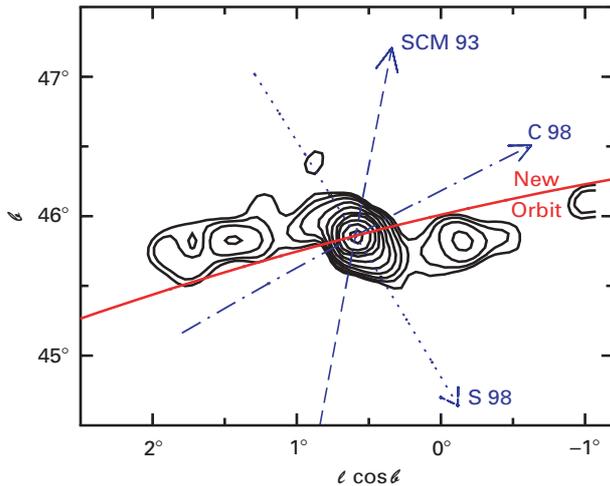


Abb. IV.19: Konturplott von Palomar 5 (schwarz) und die bisher ermittelten Richtungen der Raumbewegung (blau). Die anhand der Schweife neu bestimmte Bahn des Kugelsternhaufens ist rot gezeichnet.

Haufensterne abgestimmten Farbindex (c_2 und c_1). Die dünnen Linien kennzeichnen den Bereich, in dem die Haufensterne aufgrund der geschätzten Genauigkeit der photometrischen Messungen verteilt sein sollten. Die dick durchgezogenen Linien kennzeichnen den für die Auswahl der Mitglieder von Palomar 5 günstigsten Bereich.

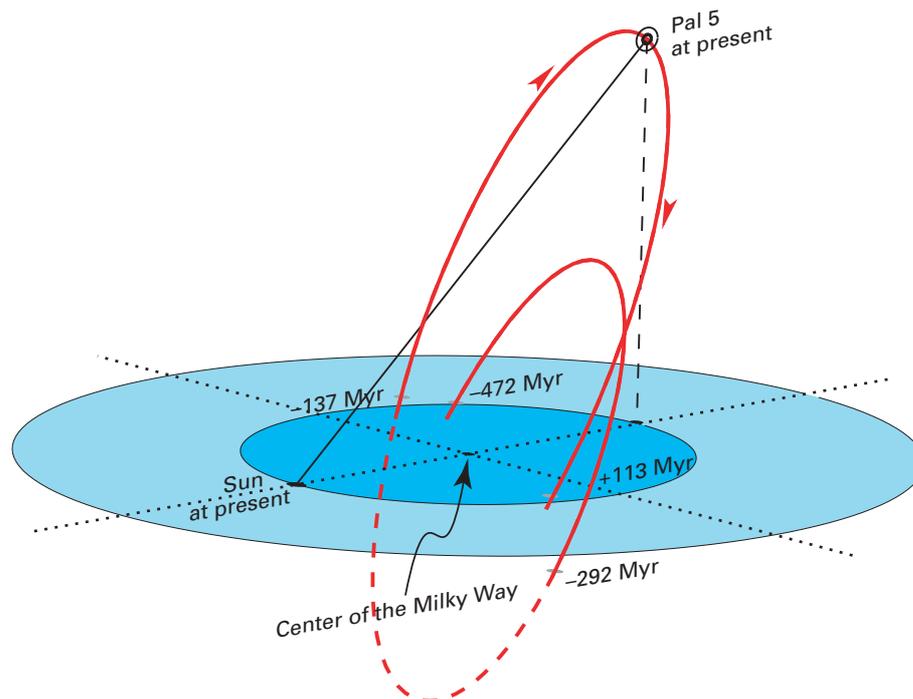
In den beiden rechten Diagrammen von Abb. IV.17 sind Sterne aus zwei Gebieten außerhalb des Haufens eingetragen. Während sich ganz rechts (field) in dem durch die dicke Linie gekennzeichneten Auswahlbereich kaum Sterne befinden, tritt in einem anderen Feld (tail, zweites Diagramm von rechts) eine signifikante Überhäufung auf. Dabei handelt es sich offenbar um ehemalige Mitglieder von Palomar 5, die den Haufen verlassen haben.

Wendet man dieses Verfahren auf das gesamte beobachtete Himmelsareal an, so zeigen sich photometrisch zum Haufen passende Sterne besonders zahlreich in zwei länglichen Bereichen außerhalb von Palomar 5 (Abb. IV.18). Sie erstrecken sich etwa 0.2 Grad, entsprechend 260 Lj, vom Zentrum nach Süden und Norden, und knicken dann in südwestlicher und nordöstlicher Richtung ab. Die Sterne ließen sich in beide Richtungen bis in etwa 0.8 Grad (1000 Lj) Entfernung vom Zentrum nachweisen. Insgesamt befinden sich in den Schweifen noch einmal etwa halb so viele Sterne wie im Haufen selbst. Dies zeigt, dass Palomar 5 bereits einen großen Teil seiner Masse verloren hat.

Die Form der beiden Schweife lässt sich erklären und stimmt mit dem überein, was Computermodelle voraussagen: Angetrieben durch das Gravitationsfeld der Milchstraße bewegen sich einige Sterne des Kugelhaufens nach außen und verlassen ihn in Richtung des Galaktischen Zentrums und auf der gegenüberliegenden Seite. Aufgrund der differentiellen Rotation (die Umlaufgeschwindigkeit nimmt mit wachsendem Abstand vom Galaktischen Zentrum ab) knicken die Bahnen der »Ausreißer« ab und folgen schließlich einer eigenen Umlaufbahn um das Zentrum der Milchstraße, die der des Haufens ähnlich ist.

Diese Form der Sternverteilung bietet die Gelegenheit, die Raumbewegung des Kugelsternhaufens anhand der beiden Schweife zu bestimmen. In den vergangenen Jahren

Abb. IV.20: Dreidimensionale Darstellung der galaktischen Bahn von Palomar 5 während der letzten 500 Millionen Jahre und bis zum nächsten Durchgang durch die galaktische Scheibe. Die Durchgänge sind durch kleine Kreise markiert und mit den Durchgangszeiten gekennzeichnet. Gegenwärtig befindet sich Palomar 5 auf der der Sonne gegenüberliegenden Seite der Galaxis und hat nahezu seinen größten Abstand vom galaktischen Zentrum.



ist mehrmals versucht worden, die Raumbewegung von Palomar 5 mit astrometrischen Verfahren direkt zu messen – mit widersprüchlichen Ergebnissen. Wie Abb. IV.19 zeigt, stimmt nur die letzte Bestimmung aus dem Jahr 1998 (C98) in etwa mit der Lage der Schweife überein.

Aufgrund der neuen Arbeit wurde die tangentielle Komponente der Raumbewegung wesentlich genauer bestimmt. Daraus ergibt sich, dass sich Palomar 5 auf einer elliptischen Bahn um das Galaktische Zentrum bewegt, wobei der geringste und der größte Abstand 23 000 und 62 000 Lj betragen (Abb. IV.20). Mit diesen Bahnelementen ließ sich auch berechnen, dass der Haufen in den vergangenen 500 Millionen Jahren die Milchstraßenebene dreimal durchquert hat. Die jetzt beobachteten Schweife sind wahrscheinlich eine Folge dieser Ereignisse. In 113 Millionen Jahren wird Palomar 5 erneut die Milchstraßenebene passieren. Da dies nahezu bei seinem kleinsten Abstand vom Galaktischen Zentrum geschieht, könnte es sein, dass sich der Kugelsternhaufen im Anschluss an diesen von besonders starken Störungen begleiteten Durchgang gänzlich auflösen wird.

Mit der Beobachtung der Schweife von Palomar 5 konnte die Theorie überzeugend gestützt werden, wonach sich Kugelsternhaufen in einem permanenten Auflösungsprozess befinden. In einem weiteren Schritt will das Astronomenteam spektroskopisch die Radialgeschwindigkeiten der Sterne in den beiden Schweifen messen. Mit diesen Daten wird sich die galaktische Bahn des Kugelsternhaufens sowie sein inneres dynamisches Verhalten noch genauer bestimmen lassen. Darüber hinaus wird das Team am MPIA weitere Kugelsternhaufen auf gleiche Weise untersuchen, sobald die Sloan-Durchmusterung ausreichend große Areale um andere Haufen abdeckt.

Turbulenz bei der Sternentstehung

Sterne entstehen tief im Innern großer Wolken aus Gas und Staub. Radiobeobachtungen haben gezeigt, dass das Wolkenmedium stark turbulent ist und dass seine Bestandteile sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegen. Stoßwellen laufen durch die Wolke hindurch und bewahren sie vor dem Kollaps. Es ist aber seit langem bekannt, dass sich die Materie lokal verdichten und neue Sterne bilden kann. Welche Rolle die Turbulenz hierbei spielt, ist noch weitgehend unklar, weil sie sich theoretisch bislang nur ansatzweise beschreiben lässt. Forscher des Instituts befassen sich schon seit Jahren mit diesem Phänomen. Im Berichtsjahr sind zwei neue Arbeiten entstanden. Sie beziehen beispielsweise erstmals die Eigengravitation der Materie in die Rechnungen mit ein und können dadurch die Beobachtungen wesentlich besser erklären als bisher.

Die turbulente Bewegung des Gases im Innern großer Molekülwolken ist in verschiedener Hinsicht ein ungelö-

stes Problem. Modellrechnungen ergeben, dass das turbulente Gas seine Bewegungsenergie sehr schnell in Form von Wärme verliert. Die hierbei auftretenden Stoßfronten werden sehr schnell gedämpft und verebben. Das widerspricht den Beobachtungen, wonach das Gas in fast allen Wolken turbulent ist. Es muss demnach Prozesse geben, welche die Turbulenz aufrecht erhalten.

Eine Zeit lang vermutete man, dass Magnetfelder so genannte magnetohydrodynamische Turbulenzen auslösen können, die ihre Energie langsamer abgeben. In der Theoriegruppe des MPIA konnte das Verhalten magnetohydrodynamischer Wellen in einer Molekülwolke mit der bis dahin genauesten Computersimulation dreidimensional nachvollzogen werden (s. Jahresbericht 1997, S. 57). Auch diese Rechnungen zeigten deutlich, dass Magnetfelder nicht in der Lage sind, die Turbulenzen aufrecht zu erhalten.

Einen denkbaren Ausweg aus diesem Problem bietet die Vermutung, dass stellare Winde und Jets oder die energie-reiche Strahlung junger, heißer Sterne dem Gas ständig kinetische Energie zuführen. Doch erscheint es mittlerweile nicht mehr plausibel, dass diese Vorgänge die Turbulenz erhalten können. Alles in allem bleibt die Turbulenz großer Wolken ein Geheimnis. Die Fragen nach ihren Ursachen und nach ihrer Auswirkung auf die Sternentstehung werden zukünftig einen Forschungsschwerpunkt am Institut bilden.

Ohne die Ursachen für die Aufrechterhaltung der Turbulenz im Einzelnen zu verstehen, lässt sie sich dennoch bei Modellsimulationen großer Wolken berücksichtigen. Allerdings konnte bislang in keinem der Modelle die Schwerkraft mit berücksichtigt werden. Dies gelang nun erstmals unserer Theoriegruppe. Hierbei wurde die vereinfachende Annahme gemacht, dass das Gas kompressibel und isotherm ist, also keine Temperaturänderungen erfährt.

Simulationen mit Turbulenz und Schwerkraft

Die Entwicklung der fiktiven Wolke wurde mit hoher Auflösung berechnet. Ihre Gesamtmasse wurde zu 200 Jeans-Massen gewählt. (Die Jeans-Masse ist jene kritische Grenze oberhalb derer eine Wolke aufgrund der eigenen Schwerkraft kollabiert. Sie liegt, abhängig von der Temperatur, typischerweise zwischen einer und fünf Sonnenmassen.) Also entsprach das Modell einer realen Wolke mit 200 bis 1000 Sonnenmassen. Die Molekülwolke wurde durch ein Ensemble von Pseudo-Gasteilchen repräsentiert und in turbulente Bewegung versetzt, indem man ihm ein bestimmtes Geschwindigkeitsfeld (Gaußsche Geschwindigkeitsverteilung) aufprägte. Dieses Feld entwickelte sich dann eigenständig weiter, wobei man die konstante Energiezufuhr so bemaß, dass sich eine durchschnittliche Gasgeschwindigkeit von sechsfacher Schallgeschwindigkeit einstellte.

Abb. IV.21 zeigt die weitere Entwicklung der Wolke. Die Turbulenz bewahrt zwar die Wolke als Ganzes vor dem Schwerkraftkollaps, aber im Laufe der Zeit bilden sich lokale Verdichtungen. Übersteigt darin die Masse einen

bestimmten Wert (Jeans-Masse), so ziehen sich die protostellaren Kerne unter der eigenen Schwerkraft weiter zusammen. Sie bilden sich vorwiegend in Gebieten, in denen sich längliche Gasverdichtungen kreuzen. Die Teilbilder b) bis d) geben den Zustand der Wolke wieder, nachdem sich jeweils 20 %, 40 % bzw. 60 % des gesamten Gasinhalts in den dichten Kernen angesammelt haben. Sie überdecken einen Zeitraum von knapp 500 000 Jahren. Ein Vergleich mit einer Simulation ohne ständig nachgelieferte turbulente Energie (Abb. IV.22) zeigt den Unterschied: Die Turbulenz hat zur Folge, dass die dichten Kerne langsamer entstehen. Außerdem ist der entstehende Sternhaufen mit ständiger Turbulenz nicht so stark konzentriert wie im anderen Fall.

Um die Ergebnisse der theoretischen Rechnungen mit den Beobachtungen vergleichen zu können, wurden so genannte Wahrscheinlichkeits-Verteilungsfunktionen berechnet. Ihnen liegt folgende Überlegung zugrunde: Beobachtet man eine Wolke im Radiobereich, so schaut

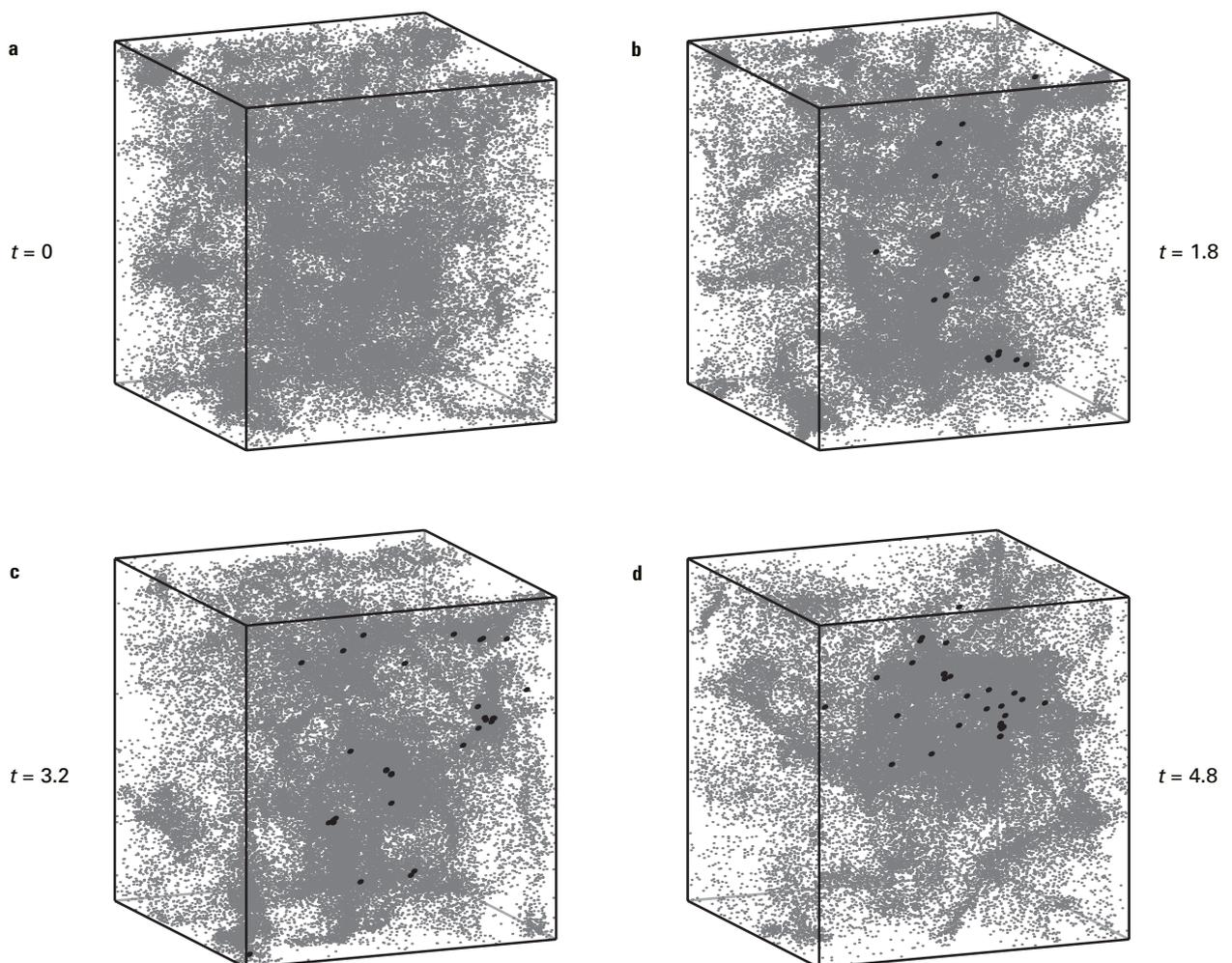
man durch sie hindurch und misst eine physikalische Größe an jeder Stelle immer nur in der Projektion auf die Himmelsebene. Die räumliche Verteilung lässt sich ohne Modellannahmen nicht ermitteln.

In den Simulationen wurde dieser Tatsache Rechnung getragen, indem Radialgeschwindigkeit und Dichte an beliebigen Stellen der Modellwolke ebenfalls »in Projektion« ermittelt wurden. Abb. IV.23 zeigt die so erhaltenen Wahrscheinlichkeits-Verteilungsfunktionen für die in Abb. IV.21 abgebildeten Stadien. Hierfür wurden die physikalischen Größen (Dichte und Radialgeschwindigkeit) an etwa 4000 Stellen in der Wolke bestimmt und als statistische Verteilung aufgetragen.

Die Dichteverteilung hat zunächst eine nahezu Gaußsche Form. Sie wird im Laufe der Zeit immer breiter und weicht stärker von der Normalverteilung ab. Dies ist eine Folge der permanenten Turbulenz. Tatsächlich werden solche breite Dichteverteilungen in interstellaren Wolken beobachtet. Ab Phase b) (vgl. Abb. IV.21) tauchen rechts die dichten protostellaren Kerne auf. Die Geschwindigkeitsverteilung behält hingegen die Gaußsche Verteilung in etwa bei und verbreitert sich nur unwesentlich.

Bei einem Vergleich mit Beobachtungen, wie sie zum Beispiel für das Sternentstehungsgebiet bei Rho Ophiuchi

Abb. IV.21: Entwicklung der Gaswolke unter dem Einfluss der Schwerkraft bei ständiger Turbulenz. Die Zeitangaben sind auf die Frei-Fall-Zeitskala normiert, die hier 100000 Jahre beträgt.



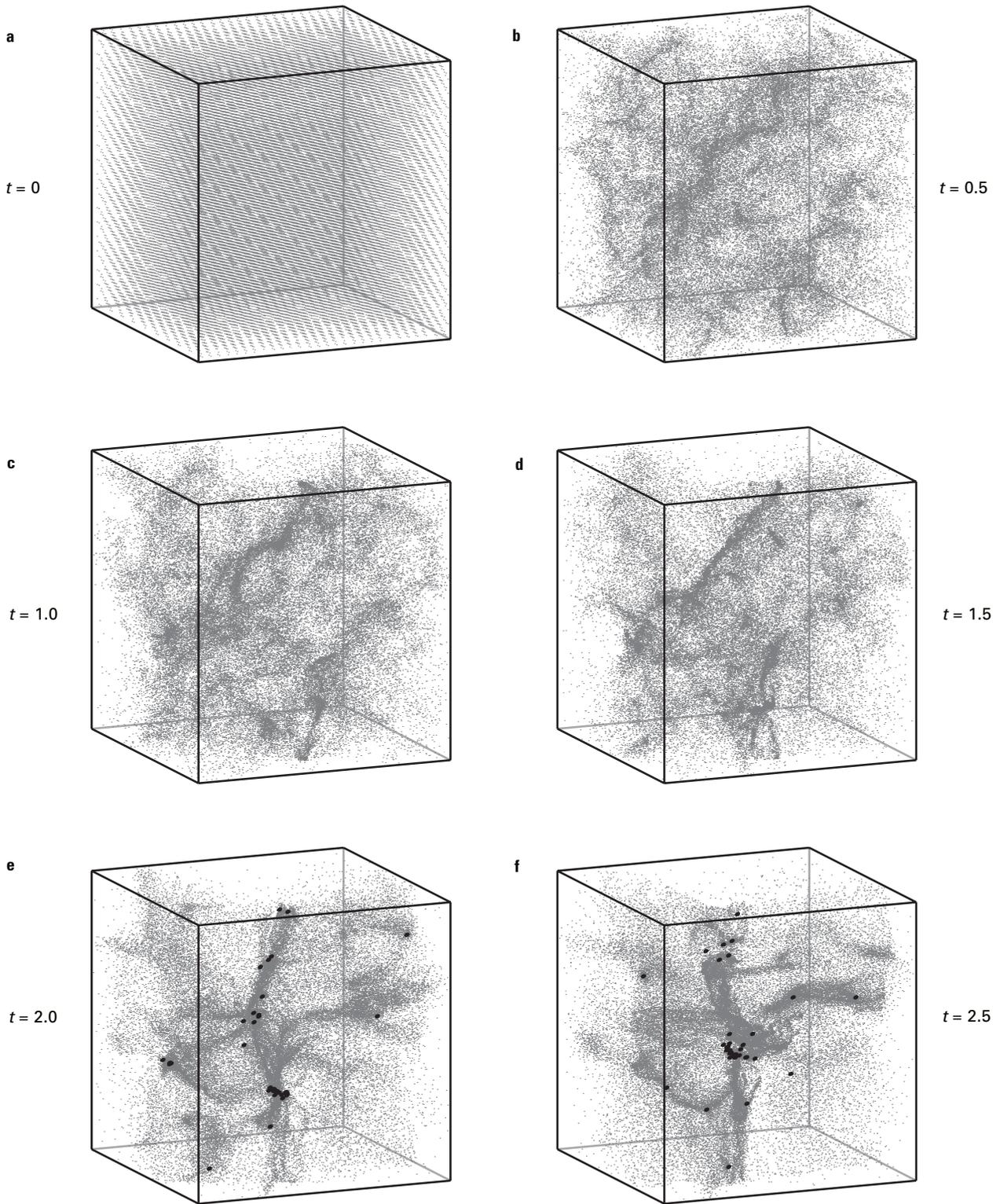


Abb. IV.22: Entwicklung der Gaswolke unter dem Einfluss der Schwerkraft ohne Zuführung weiterer Turbulenz. Wie in Abb.

IV.21 sind die angegebenen Zeiten auf die Freifall-Zeitskala normiert.

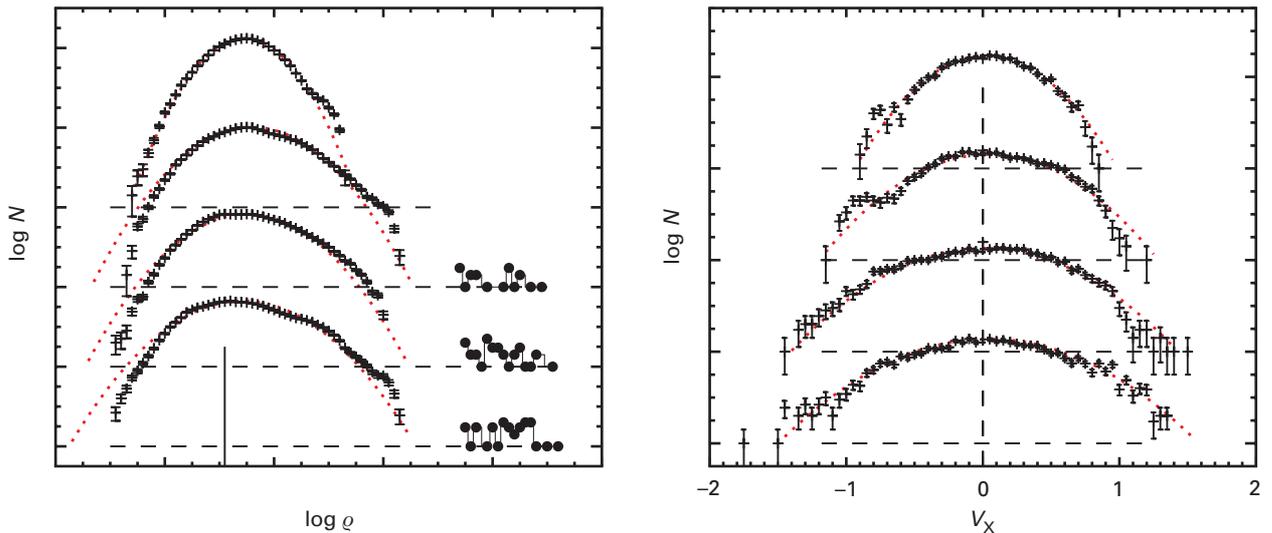


Abb. IV.23: Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Dichte (links) und die Radialgeschwindigkeit (rechts). In der Dichteverteilung erkennt man ab Phase b) die Entstehung der protostellaren Kerne (Punkte).

oder im Orion vorliegen, erweist es sich, dass die Modelle mit permanenter Turbulenz und Schwerkraft die Wirklichkeit wesentlich besser wiedergeben als ohne diese Eigenschaften. Damit scheinen die Modelle die Vorgänge im Innern interstellarer Wolken mit Sternentstehung gut zu beschreiben. In Zukunft wäre es zudem interessant zu prüfen, ob es möglich ist, aus den Formen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf die physikalische Ursache der Turbulenz zu schließen. Hierbei ist jedoch unter anderem zu bedenken, dass diese Verteilungsformen von der zufälligen Beobachtungsrichtung abhängen.

Rotation turbulenter Wolken

Auf kleineren Skalen von etwa einem halben Lichtjahr Durchmesser finden sich im Innern der Wolken die verdichteten Wolkenkerne. Ihre Masse beträgt etwa eine Sonnenmasse, sie sind die direkten Vorläufer der Sterne. Da sie im turbulenten Medium entstehen, sind sie selbst auch turbulent. Radioastronomen haben in vielen dieser Wolkenkerne Geschwindigkeitsfelder (genauer: Geschwindigkeitsgradienten) gemessen: Während die eine Seite der Wolke auf uns zu kommt, bewegt sich die andere von uns fort. Bislang wurde dies als Rotation der Wolken interpretiert. Den Drehimpuls könnten die Wolken prinzipiell aus der differentiellen Rotation des Milchstraßensystems erhalten. Das bedeutet, dass die Geschwindigkeit eines Körpers mit zunehmendem Abstand vom galaktischen Zentrum abnimmt. Ein ausgedehnter Körper, etwa wie eine Wolke, auf dessen Teilbereiche dies ebenfalls zutrifft, wird dadurch in Rotation versetzt.

Der Drehimpuls sollte auf die Sternentstehung einen entscheidenden Einfluss haben. Denn er bewirkt eine Rotation der protostellaren Kerne und deren Abplattung zu einer Scheibe, in der dann Doppel- und Mehrfachsterne und auch Planetensysteme entstehen. Die Stärke des Drehimpulses bestimmt die Abstände der Sterne in diesen Systemen und auch die Eigenschaften der Planetensysteme.

Es tauchten jedoch immer wieder Zweifel daran auf, ob sich die Rotation der Wolken überhaupt nachweisen lässt. Sie sollte vielmehr von der heftigen Turbulenz vollständig überdeckt werden. Grundsätzlich lässt sich der Drehimpuls einer Wolke allein deshalb nur schwer bestimmen, weil man – wie oben beschrieben – die Radialgeschwindigkeiten nur in Projektion auf die Himmelsfläche und als Summe über den gesamten Sehstrahl messen kann.

Theoretiker am MPIA haben nun gemeinsam mit Kollegen aus den USA den Zusammenhang zwischen Turbulenz und Rotation untersucht und die Ergebnisse ihrer Rechnungen mit Beobachtungen verglichen. In den Rechnungen wurde eine Wolke simuliert, die in der Realität einen Durchmesser von etwa 0.7 Lj und eine Gesamtmasse von 5 Sonnenmassen hätte. Die Dichte nahm darin von außen nach innen exponentiell zu. Diesem System wurde ein turbulentes Geschwindigkeitsfeld aufgeprägt und anschließend dessen Entwicklung verfolgt. Dann wurde der »Film« gestoppt und das Geschwindigkeitsfeld bestimmt. Dabei wurde deutlich, dass sich die Einzeldrehimpulse der kleinskaligen Turbulenzfelder im Mittel nicht gänzlich gegeneinander aufheben, sondern dass in den meisten Fällen ein zufälliger Nettodrehimpuls übrig bleibt. Er täuscht für den Beobachter eine großräumige Rotation der Wolke vor.

Hierbei kommt zudem zum Tragen, dass die turbulente Geschwindigkeit mit der Größe der Turbulenzzellen anwächst. Damit beherrschen die größten Zellen das Geschwindigkeitsbild, und das sind jene, die sich über die gesamte Wolke ausdehnen. Sie bewirken, dass Beobachter einen Geschwindigkeitsgradienten in einer Wolke messen.

Dieser stammt aber nicht von einer Rotation, sondern von der inneren Turbulenz.

Das bedeutet, dass man aus dem gemessenen Geschwindigkeitsgradienten einer Wolke nicht deren Drehimpuls errechnen kann. Wie groß dieser Nettodrehimpuls ist, hängt von der zufälligen Projektion der Wolke an den Himmel, also von der Beobachtungsrichtung, ab. Dementsprechend zeigen auch die aus 4000 simulierten Fällen berechneten Werte für den Drehimpuls eine breite Verteilung (Abb. IV.24). Sie liegen in einem Bereich von $(0.5 - 2.5) \cdot 10^{21} \text{ cm}^2/\text{s}$. Dies stimmt sehr gut mit einem Wert von $1.2 \cdot 10^{21} \text{ cm}^2/\text{s}$ überein, den man aus Beobachtungen von Wolken mit Durchmessern um 0.6 Lj gefunden hatte. Diese breite Verteilung passt auch sehr gut zu der Tat-

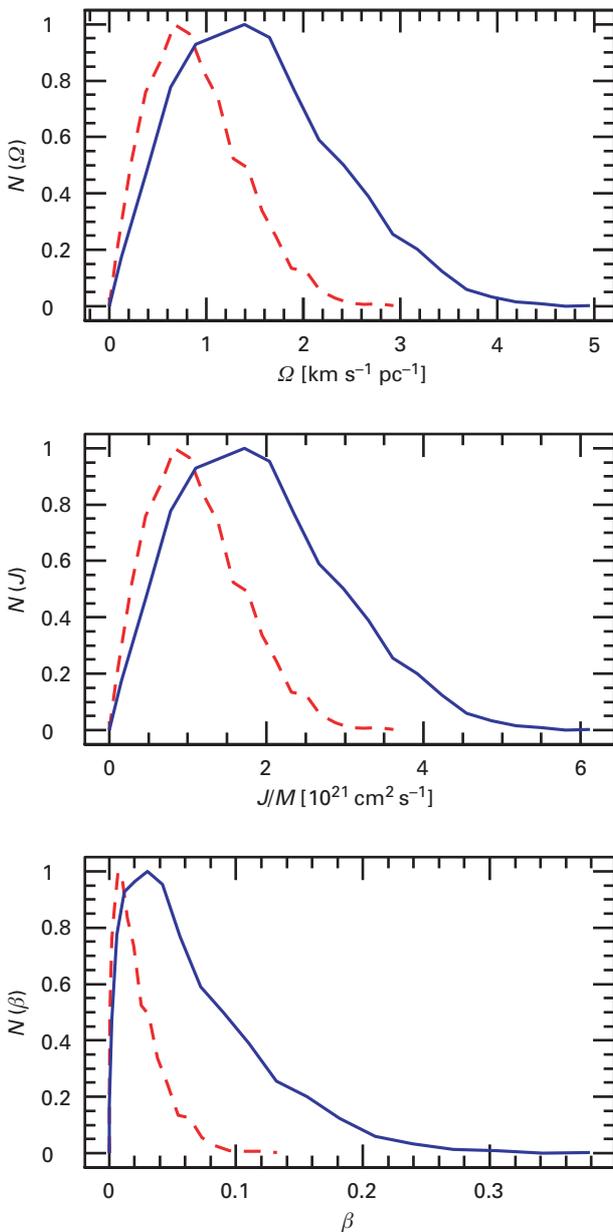


Abb. IV.24: Verteilung der durch Turbulenz erzeugten Nettodrehimpulse. Gezeigt sind zwei Verteilungen, die sich aus unterschiedlichen Turbulenzfeldern ergeben.

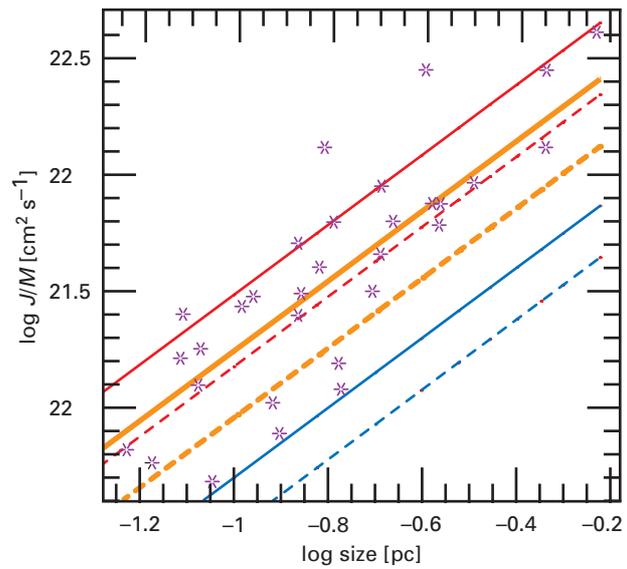


Abb. IV.25: Aus Beobachtungen abgeleitete Drehimpulse (Sterne) und Ergebnisse von Simulationen mit unterschiedlichen Turbulenzfeldern. Die Werte sollten innerhalb der unteren gestrichelten und der oberen durchgezogenen Linie liegen.

sache, dass die Abstände der Komponenten in Doppelsternen über einen weiten Bereich streuen: Ein kleiner Drehimpuls führt zu einem engen Doppelstern, ein großer zu einem weiten.

Mit einfachen Abschätzungen lässt sich das numerisch gefundene Resultat auf größere Wolken mit Durchmessern bis zu etwa 4 Lj extrapolieren. Auch hier (Abb. IV.25) fallen die Beobachtungen in den berechneten Bereich.

Damit hat sich die Turbulenz als Ursache für den Nettodrehimpuls erwiesen. Sie ist die Ursache für die Entstehung von Doppelsternen. In zukünftigen Studien wollen die Forscher des Instituts weitere physikalische Effekte mit einbeziehen, um sich der Realität mit ihren Simulationen noch weiter anzunähern. Hierzu zählt zum Beispiel die Tatsache, dass das Geschwindigkeitsfeld die Dichteverteilung beeinflusst und umgekehrt.

Planetenentstehung in Doppelsternen

Sowohl von theoretischer als auch von beobachterischer Seite her ist es heute klar, dass Sterne überwiegend in Doppel- und Mehrfachsystemen entstehen. Sind die beiden Komponenten weit voneinander entfernt, so ist jede in ihrer Entstehungsphase von einer eigenen Scheibe aus Staub und Gas umgeben; sind sie sehr nahe beieinander, so bildet sich um sie herum eine gemeinsame Scheibe aus. In diesen Scheiben können Planeten entstehen. Bislang haben sich Theoretiker fast ausschließlich mit der Planetenbildung bei Einzelsternen befasst und damit den größten Teil der jungen Sterne ignoriert. Die Theoriegruppe am MPIA hat sich jetzt mit der Frage auseinander gesetzt, auf welche Weise ein Begleitstern auf

die Planetenentstehung einwirkt. Bereits in diesen ersten Studien wird deutlich, dass in bestimmten Doppelsystemen die Planetenbildung stark gestört oder verhindert wird.

Beobachtungen im Submillimeterbereich, bei denen die Wärmestrahlung des Staubes sichtbar wird, deuten darauf hin, dass Doppelsysteme mit Abständen bis zu einer Astronomischen Einheiten (AE) eine gemeinsame (zirkumbinäre) Scheibe ausbilden. In weiten Paaren mit Abständen von mehr als hundert AE steht jeder Stern im Zentrum einer eigenen (zirkumstellaren) Scheibe. Was in dem großen Bereich dazwischen geschieht, ist weitgehend unklar und hängt unter anderem von den Massen der Sterne, den Exzentrizitäten der Umlaufbahnen und dem Drehimpuls der Scheibe ab (s. Jahresbericht 1997, S. 59). Beobachtungen liefern bislang nur wenige Ergebnisse: In einem Doppelsystem, GG Tau, sind die beiden 45 AE voneinander entfernten Sterne von einer gemeinsamen Scheibe umgeben. Astronomen des MPIA konnten 1998 nachweisen, dass der Stern Z CMA aus zwei 100 AE voneinander entfernten Sternen besteht, die jeder von einer eigenen Scheibe umge-

ben sind (Jahresbericht 1998, S. 16). Können in solchen Systemen Planeten entstehen?

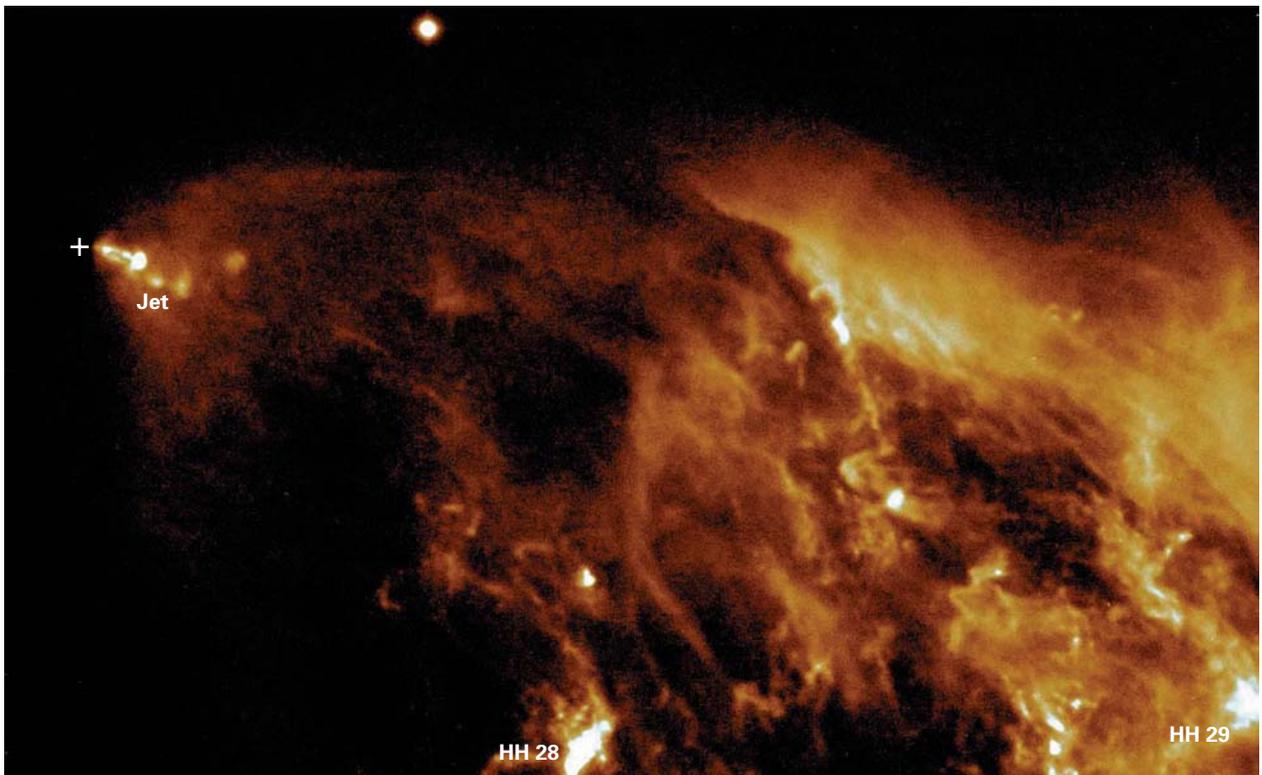
Es sind heute drei Fälle gesichert, in denen extrasolare Planeten in Doppelsystemen existieren: 16 Cyg B, 55 Cnc und Tau Boo. Hier sind die Sterne mit 700, 1150 bzw. 240 AE weit von einander entfernt, und jeweils ein Planet umkreist einen der beiden Sterne auf einer sehr engen Bahn (Bahnradien: 1.7, 0.1 bzw. 0.05 AE). Der Begleitstern ist also mehrere hundert- bis zehntausend mal weiter vom Hauptstern entfernt als der Planet, so dass seine gravitative Störung gering ist.

Mitarbeiter der Theoriegruppe des Instituts haben nun mit Hilfe von Computersimulationen untersucht, ob und wie sich in Doppelsystemen Planeten bilden können. Da der Rechenaufwand hierfür sehr groß ist, haben sich die Forscher auf einen Spezialfall konzentriert, der einem gut untersuchten realen Doppelsystem entspricht. Es handelt sich um L 1551 IRS 5 (Abb. IV.26), ein junges, 450 LJ entferntes Objekt, das auch Astronomen des MPIA über Jahre hinweg eingehend beobachtet haben.

Computersimulation eines realen Vorbilds

L 1551 IRS 5 ist ein etwa 500000 Jahre junger Doppelsystem, dessen Komponenten ca. 50 AE voneinander entfernt sind. Jeder ist von einer Scheibe mit etwa 20 AE Durchmesser und jeweils 0.05 Sonnenmassen umgeben. Auf größeren Skalen ist der Stern in einen ausgedehnten Nebel mit Ausmaßen von 2400 AE \times 1100 AE eingebettet. Charakteristisch für einen jungen Doppelsystem sind auch

Abb. IV.26: : L 1551, aufgenommen am Calar-Alto-Observatorium im sichtbaren Licht. Das Kreuz kennzeichnet die Position des hinter Staub verborgenen und daher nur im Infraroten sichtbaren jungen Sterns IRS 5. Ebenfalls erkennbar der von IRS 5 ausgehende Jet und der ausgedehnte kometarysche Reflexionsnebel.



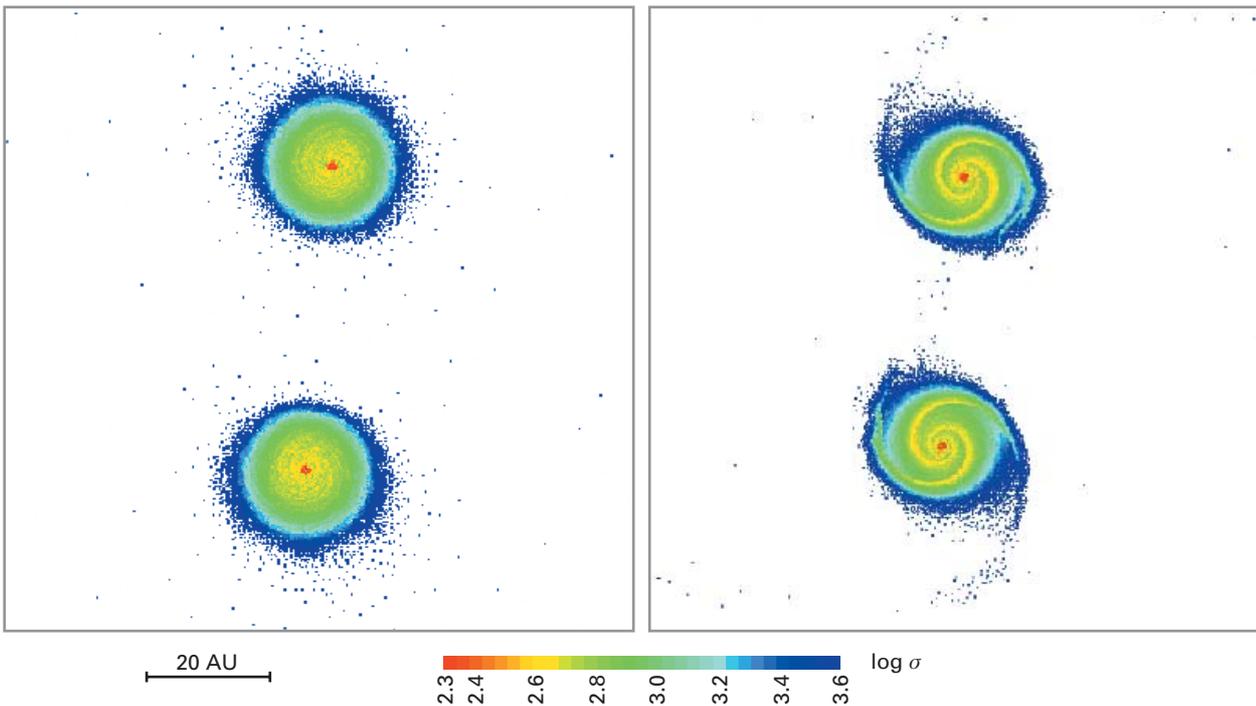


Abb. IV.27: Die zwei Scheiben des simulierten Doppelsystems, links vor und rechts nach der Periastris. Die Sterne laufen gegen den Uhrzeigersinn, die Periastris erreichen sie, wenn sie beide bei $y = 0$ stehen und 35 AE voneinander entfernt sind. Die beiden Sterne haben rechts ihre Positionen gegenüber links vertauscht.

zwei eng gebündelte Teilchenstrahlen, so genannte Jets, die in zwei entgegengesetzten Richtungen ins All schießen.

Die Theoretiker haben dieses Objekt als reale Vorlage für ihre Computersimulation verwendet. Es wurden zwei identische Sterne mit jeweils 0.5 Sonnenmassen angenommen, die beide von ebenfalls identischen Scheiben mit jeweils 30 AE Durchmesser und 0.05 Sonnenmassen umgeben sind. In der Simulation bestand jede Scheibe aus 60 000 Teilchen, die anfangs den Stern auf Kreisbahnen umlaufen. Dichte und Temperatur in der Scheibe nahmen vom Stern nach außen gemäß Potenzgesetzen mit $r^{-3/2}$ bzw. $r^{-1/2}$ ab. Zudem wurde angenommen, dass sich die beiden Sterne auf elliptischen Bahnen (Exzentrizität 0.3) gegenseitig umlaufen, auf denen sie für einen Umlauf etwa 340 Jahre benötigen.

Für die Materie in der Scheibe wurde ferner eine Viskosität angenommen, so dass auch Stoßwellen einsetzen und Turbulenz stattfinden konnten. Diese Vorgänge erhitzen die Scheiben und sind von wesentlicher Bedeutung für die Entwicklung des Systems. Zudem wurde berücksichtigt, dass der Staub bei diesen Vorgängen entsprechend seiner Temperatur thermisch strahlt.

Das Verhalten der Scheiben wurde nun über einen Zeitraum von acht Umläufen, oder 2700 Jahren verfolgt. Abb. VI.27 zeigt das System kurz vor und kurz nach dem Durchgang durch den Punkt der stärksten Annäherung (Periastris).

Man erkennt, dass die Schwerkraft der beiden Systeme während der Periastris in den Scheiben Spiralwellen hervorruft. Allerdings lösen sich diese rasch wieder auf, sobald sich die Sterne auf ihren elliptischen Bahnen wieder voneinander entfernen. Bei jedem Umlauf wiederholt sich dieser Vorgang der zyklischen Stoßwellenentstehung in nahezu unveränderter Form. Man kann daher annehmen, dass er sich auch über längere Zeiträume so fortsetzt. Dass die Spiralstruktur sich nach kurzer Zeit wieder auflöst, ist eine Folge der Aufheizung durch diese Stoßwellen: Hohe Temperaturen stabilisieren die Scheibe.

Diese zyklische Erwärmung des Staubes in der Scheibe verhindert vermutlich die Planetenbildung. Die Theoretiker gehen heute nämlich davon aus, dass Planeten entstehen

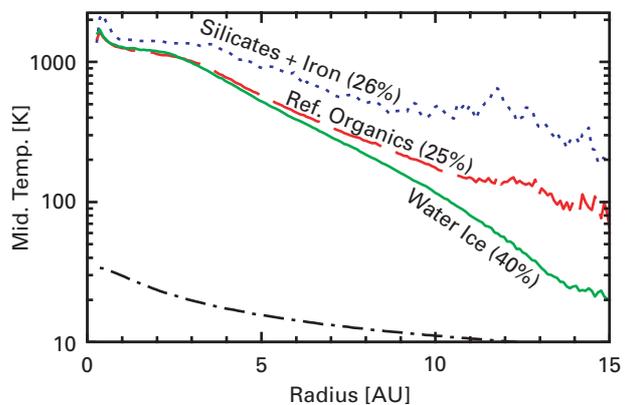


Abb. IV.28: Temperaturen in der Scheibe vor (durchgezogen) und nach (gestrichelt) der Periastris, sowie in der ungestörten Scheibe (strichpunktiert). Die gepunktete Linie gibt die Maximaltemperaturen in den Spiralarmen an. Rechts sind die Verdampfungstemperaturen verschiedener Partikelarten angegeben.

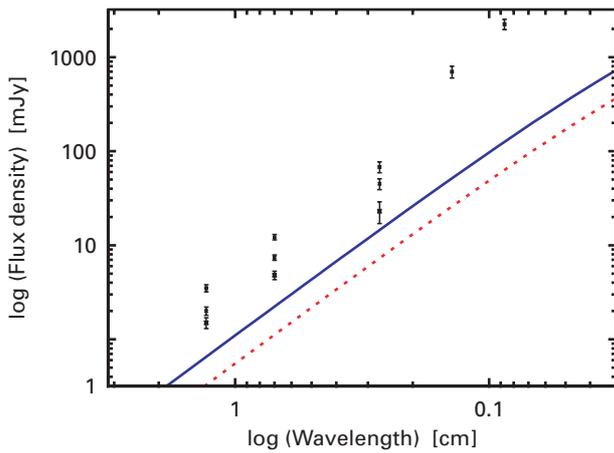


Abb. IV.29: Strahlungsintensitäten bei L 1551 IRS 5 (Kreuze und Punkte) im Vergleich zu den Ergebnissen der Simulation: gepunktete Gerade für eine der beiden Doppelsternkomponenten, durchgezogene Gerade für bei Komponenten zusammen.

hen, wenn Spiralarme, die Verdichtungen im Staub darstellen, in kleinere Fragmente zerfallen, die sich dann weiter verdichten. Die Erhitzung der Scheibe verhindert diesen Vorgang aber offenbar.

Außerdem erreichen die Temperaturen so hohe Werte, dass entstandene Staubkörner wieder verdampfen und sich nicht zu größeren Körpern zusammenlagern können. Dies trifft insbesondere für Teilchen aus Wassereis zu, die schätzungsweise 40 % der anfänglichen Eiskörnchen stellen. In den Spiralarmen erreichen die Temperaturen indes Werte zwischen 200 und 1100 K, während die Wassereisteilchen bereits bei etwa 150 K zu verdampfen beginnen (Abb. IV.28). Die Spiralarme rotieren unabhängig von den Staub-

teilchen mit der Umlaufdauer des Doppelsterns. Dadurch wandert die gesamte Materie der Scheibe mehrmals durch diese Arme hindurch und erwärmt sich, bevor sich die Arme wieder auflösen. Da ein Staubteilchen etwa zwei Jahre benötigt, um durch einen Arm hindurchzuwandern, ist auch genügend Zeit vorhanden, um es zu verdampfen. Lediglich sehr feste Stoffe, wie eisenreiche Silikate oder organische Verbindungen, können in der Scheibe überleben und möglicherweise weiter anwachsen, vor allem in den kühleren Außenbereichen.

Interessant ist auch ein Vergleich zwischen der im Modell ermittelten Strahlung, welche die Scheiben abgeben, und den Beobachtungen. Abb. IV.29 zeigt die gemessenen Werte für beide Komponenten gemeinsam (Punkte) und die Einzelkomponenten (Kreuze). Trotz einiger Unsicherheiten in den Messwerten, liegen doch die Resultate der Simulation signifikant unter den gemessenen. Das ließe sich darauf zurückführen, dass die Temperaturen in den Scheiben noch höher sind als in den Modellen. Das wiederum würde noch stärker gegen die Möglichkeit sprechen, dass sich dort Planeten bilden können.

Alles in allem machen die Ergebnisse deutlich, dass in solchen Doppelsternen keine Planeten entstehen können oder aber deren Bildung zumindest stark behindert wird. Diese Simulation bilden erst den Anfang wesentlich umfangreicherer Studien, in denen zukünftig beispielsweise Heizung und Kühlung der Scheibe detaillierter untersucht und Scheiben mit unterschiedlichen Massen behandelt werden sollen. Insbesondere wäre ein Vergleich von Sternen mit unterschiedlichen Massen und in einem weiten Abstandsreich sehr interessant. Außerdem wäre eine Ausdehnung auf dreidimensionale Rechnungen wünschenswert.

IV.2 Extragalaktische Astronomie

Spiralgalaxien mit optischer Schiefelage

Galaxien haben ein wechselvolles Leben. Sie kommen sich nahe, stoßen zusammen oder verschmelzen miteinander. In jüngster Vergangenheit entdeckten Astronomen immer wieder neue Formen dieser kosmischen Wechselwirkungen, die sich auf die Entwicklung der Sternsysteme wesentlich auswirken. Forscher des MPIA haben gemeinsam mit Kollegen vom Steward Observatory, Arizona, Spiralgalaxien studiert, bei denen sich auf entgegen gesetzten Seiten des Galaxienzentrums ungleiche Anteile der Sterne befinden. Dabei fanden sie heraus, dass mit dieser »optischen Schiefelage« eine erhöhte Sternentstehungsrate verbunden ist. Die Ursache hierfür ist nicht abschließend geklärt. Vermutlich werden aber die Schiefelage und die erhöhte Sternentstehung durch nahe Vorbeiflüge kleiner Galaxien verursacht.

Es steht heute außer Frage, dass in der Entwicklung von Galaxien die Wechselwirkung mit benachbarten Objekten eine bedeutende Rolle spielt. Das kosmologische Szenario des hierarchischen Aufbaus geht sogar davon aus, dass die großen Galaxien durch Verschmelzen mehrerer kleiner Galaxien im frühen Universum entstanden sind (siehe »Die extragalaktische Hintergrundstrahlung im fernen Infrarot« auf S. 71). Aber auch im heutigen Universum lassen sich noch spektakuläre Fälle beobachten, in denen zwei große Galaxien zusammenstoßen und dabei ein Feuerwerk der Sternentstehung auslösen (siehe »Kalter Staub in der Antennengalaxie« auf S. 23). Gleichzeitig strömt vermutlich vermehrt Materie in die galaktischen Zentralgebiete, um dort von einem Schwarzen Loch verschluckt zu werden. Selbst wenn zwei Galaxien sich nur nahe kommen, führen die starken Gezeitenkräfte dazu, dass in ihnen die interstellare Materie aufgewirbelt und die Sternentstehung dadurch gefördert wird. Darüber hinaus verdichten sich die Anzeichen dafür, dass die elliptischen Galaxien durch Verschmelzen von Spiralgalaxien entstanden sind (s. Jahresbericht 1999, S. 67).

Doch nicht immer sind die Auswirkungen von Wechselwirkungen zwischen Galaxien so spektakulär. Auch schwächere gravitative Kräfte können signifikante Folgen haben. Sie können zustande kommen, dass zwei große Galaxien weiter voneinander entfernt aneinander vorbeifliegen oder dass eine kleine Galaxie mit ihrem Schwerfeld Struktur und Kinematik im Innern einer großen beeinflusst. Es erscheint plausibel, dass hierbei auch die Sternentstehung angeregt wird.

Schon zu Beginn der 80er Jahre deutete sich an, dass etwa die Hälfte aller Spiralgalaxien asymmetrische Rota-

tionskurven aufweisen oder auch die Verteilung des atomaren Wasserstoffs nicht völlig symmetrisch ist. Um diesem Phänomen weiter auf den Grund zu gehen, wurden ab Mitte der 90er Jahre asymmetrische Massenverteilungen in Spiralgalaxien systematisch untersucht. Als Indikator dient hier das Licht aller Sterne. Prinzipiell könnten Asymmetrien in der Oberflächenhelligkeit auch dadurch zustande kommen, dass ausgedehnte Staubkomplexe größere Teile der Sternfelder abdecken. Diese Ursache konnte jedoch 1998 überzeugend ausgeschlossen werden.

Wenn in den Scheiben vieler Spiralgalaxien die Sterne auf größeren Skalen nicht gleichmäßig verteilt sind, kommt als Ursache wohl nur ein äußerer Einfluss, nämlich eine Störung durch eine benachbarte Galaxie, in Frage. Einfache Abschätzungen und Computersimulationen lassen darauf schließen, dass die Störung des Schwerfeldpotentials und die daraus resultierende asymmetrische Massenverteilung nach etwa einer Milliarde Jahren wieder ausgeglichen sein sollte. Es handelt sich also auf kosmologischen Zeitskalen eher um eine vorübergehende Störung. Da aber viele Spiralgalaxien diese »optische Schiefelage« zeigen, muss sie relativ häufig auftreten.

In einer neuen, systematisch angelegten Studie beobachteten Astronomen des MPIA gemeinsam mit einem Kollegen vom Steward Observatory, Arizona, 40 Spiralgalaxien. Sie wählten dazu relativ nahe Objekte (Rotverschiebung $z < 0.03$) aus, bei denen man ziemlich genau senkrecht auf die Scheibe schaut. Abb. IV.30 zeigt einige Beispiele. Ist eine Spiralgalaxie stark gegen die Sichtlinie geneigt, so lässt sich ihre Oberflächenhelligkeit wegen der erheblichen Abschattung durch Staub nur schwer messen.

Diese Galaxien wurden über die gesamte Fläche hinweg spektroskopiert, indem ein langer Spalt mehrfach parallel verschoben wurde. Das ermöglichte es den Astronomen, die Gesamthelligkeit der Galaxien im Lichte spezieller Spektrallinien zu ermitteln. Insbesondere die Balmerlinien des Wasserstoffs sind hierfür interessant, weil ihre Intensität ein Indikator für junge, heiße Sterne ist. Die Forscher konnten somit gleichzeitig die Sternentstehungsrate bestimmen.

Praktisch wurde dies so bewerkstelligt, dass zunächst zwei Musterspektren erstellt wurden. Eines dieser Muster stammte von einem sonnenähnlichen Stern (Spektraltyp G). Dieses repräsentierte die „alte“ Sternpopulation in einer Galaxie. Ein zweites Musterspektrum stammte von einem heißen A-Stern, der die junge Population darstellte. Aus einem Vergleich der aufgenommenen Spektren mit den Mustern ließ sich dann die Sternentstehungsrate in den jeweiligen Galaxien abschätzen. Anschließend wurde die Intensität der Sternentstehung mit dem Grad der optischen Asymmetrie der Galaxien verglichen. Diese Abweichung von vollkommen homogener Oberflächenhel-

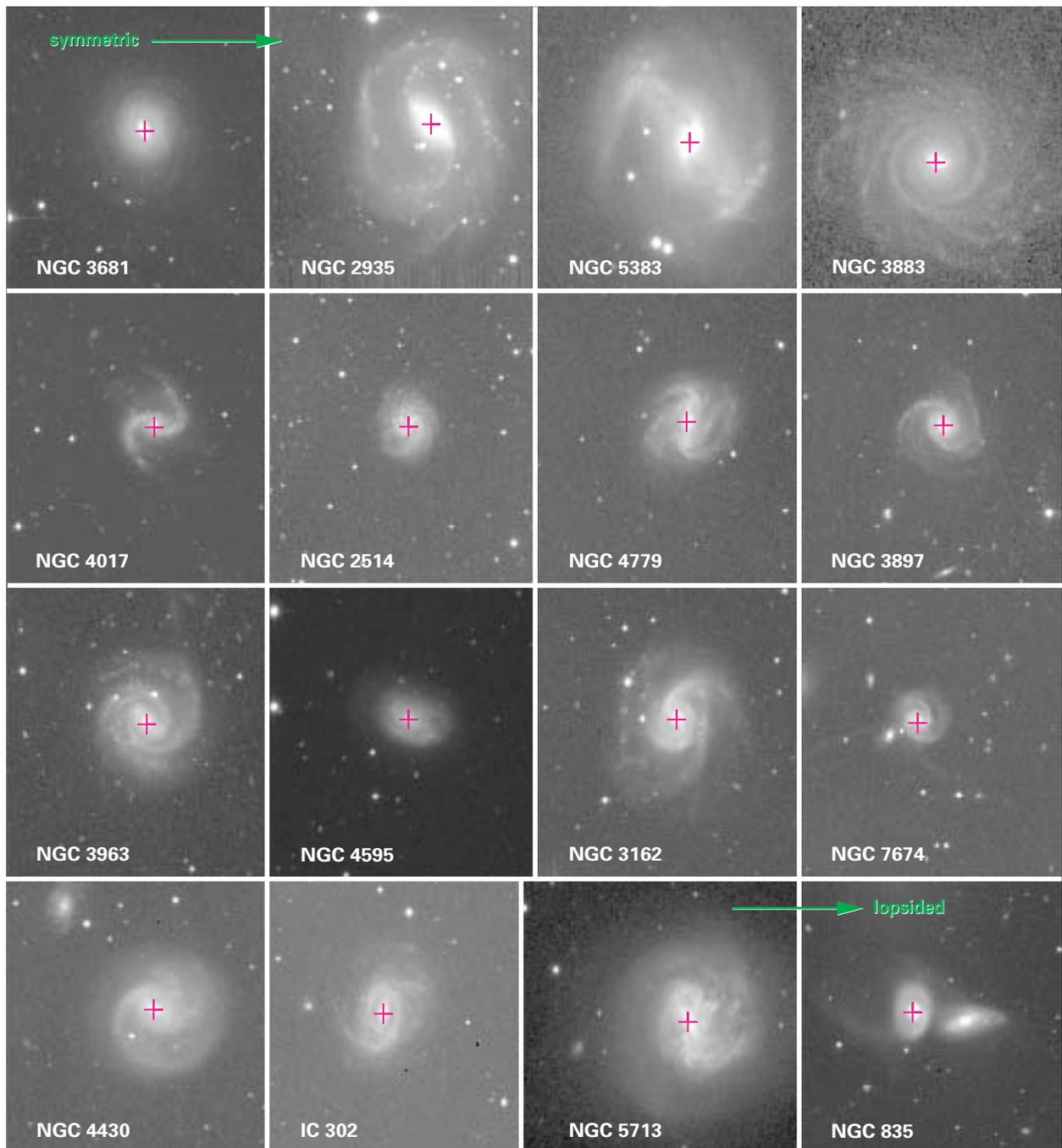


Abb. IV.30: Beispiele für einige der beobachteten Galaxien mit und ohne ausgeprägte optische Asymmetrie. Die Galaxien werden von links oben nach rechts unten immer asymmetrischer.

ligkeit ließ sich mit einem mathematischen Verfahren quantifizieren.

Abb. IV.31 zeigt, dass der Anteil an jungen A-Sternen mit der optischen Asymmetrie ansteigt. Da A-Sterne eine Lebensdauer von nur etwa 500 Millionen Jahren haben, muss demnach auch die optische Asymmetrie nach ihrer Entstehung mindestens ebenso lange andauern. Aus den

Spektren lässt sich abschätzen, dass in den asymmetrischen Galaxien innerhalb der vergangenen 500 Millionen Jahre rund eine Milliarde Sterne entstanden sind. Das bedeutet eine um einen Faktor 8 erhöhte Sternentstehungsrate gegenüber normalen Spiralgalaxien. In einer solchen Ära entstehen etwa 10 % aller Sterne einer durchschnittlichen Galaxie.

Es handelt sich damit also um eine wichtige Phase in der Entwicklung der Galaxien. Etwa ein Fünftel aller beobachteten Galaxien sind asymmetrisch. Geht man davon aus, dass eine solche Störung etwa eine Milliarde Jahre andauert, so bedeutet dies, dass jede Spiralgalaxie diesen

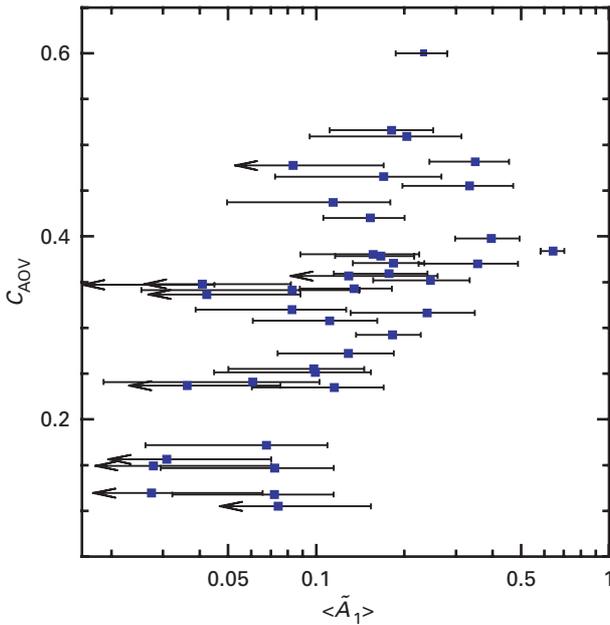


Abb. IV.31: Ermittelter Anteil an jungen A-Sternen (C_{AOV}) in Abhängigkeit von der optischen Asymmetrie $\langle A_1 \rangle$.

Zustand in ihrer bisherigen Existenz ungefähr vier Mal erlebt hat.

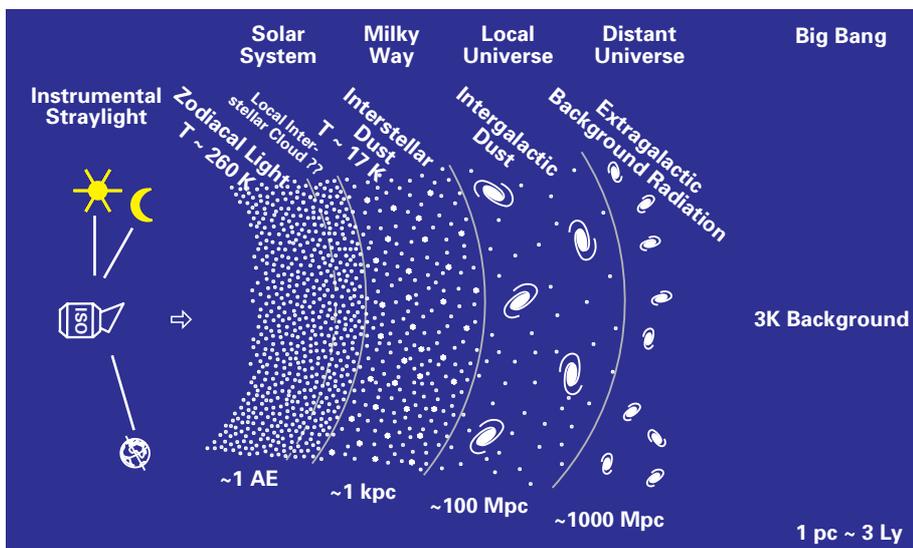
Damit ist klar, dass in der Galaxienentwicklung Ereignisse dieser Art eine bedeutende Rolle spielen. Die Untersuchungen hierzu stehen indes noch am Anfang. Nachfolgende Beobachtungen sollen zum einen die Ursache der optischen Schiefelage klären. Die Wechselwirkung mit nahen, kleinen Galaxien ist wahrscheinlich, muss aber noch geprüft werden. Die Daten des SLOAN Digital Sky Survey sollten sich hierfür gut eignen. Gleichzeitig müssten auf theoretischer Seite numerische Modelle mit hoher räumlicher Auflösung erstellt werden, mit denen sich die Auswirkungen der schwachen Wechselwirkung zwischen Galaxien studieren lassen.

Die extragalaktische Hintergrundstrahlung im fernen Infrarot

Eine wichtige Aufgaben der beobachtenden Kosmologie besteht darin, 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? Dies sind nur zwei der bedeutenden Fragen. Von nahen Galaxien ist bekannt, dass bei intensiver Sternentstehung große Staubmassen erwärmt werden, die dann im mittleren und fernen Infrarot leuchten. Da die Spektren von Galaxien aus dem frühen Universum rotverschoben sind, sollten diese Objekte vor allem im fernen Infrarot und im anschließenden Millimeterbereich beobachtbar sein. Das Satellitenobservatorium ISO bot erstmals die Gelegenheit, diese extragalaktische Hintergrundstrahlung genauer zu untersuchen. Mehrere umfangreiche Projekte waren daher diesem Thema gewidmet. Sie tragen jetzt erste Früchte. Die Messdaten belegen eindeutig, dass die jungen Galaxien eine starke Entwicklung durchgemacht haben, wobei geradezu explosionsartig neue Sterne entstanden sind.

Die Instrumente auf ISO waren nahezu im gesamten Infrarotbereich bis zu Wellenlängen um 200 μm empfindlich. Damit haben sie jede Art von Staub, auch den kältesten, registriert. ISO hat praktisch durch mehrere „Vorhänge“ hindurch geschaut, die sich in ganz unterschiedlichen Entfernungen von der Erde befinden (Abb. IV.32). Im

Abb. IV.32: Schema der unterschiedlichen »Infrarotschleier«, durch die ISO hindurchschaute. Diese Vordergrundquellen sind um Größenordnungen intensiver als die extragalaktische Hintergrundstrahlung, was deren Analyse stark erschwert.



Sonnensystem ist dies der interplanetare Staub. Unter guten Bedingungen ist sogar das von ihm reflektierte Sonnenlicht als Zodiakallicht mit bloßem Auge erkennbar. Da dieser Staub mit 270 K vergleichsweise warm ist, ist seine Wärmestrahlung 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. Über den Staub außerhalb der Milchstraße wusste man bis vor kurzem sehr wenig. Beobachtungen mit ISOPHOT deuteten jedoch darauf hin, dass es auch in Galaxienhaufen Staub gibt. Untersuchungen hierzu laufen derzeit noch am MPIA (s. Jahresbericht 1997, S. 26).

Die extragalaktische Hintergrundstrahlung ist erst seit kurzem bekannt. Sie ließ sich mit dem amerikanischen Satellitenteleskop COBE erstmals genauer untersuchen. Das auf COBE befindliche Instrument DIRBE besaß jedoch nur eine geringe räumliche Auflösung von 42 Bogenminuten und war nicht in der Lage, Einzelquellen auszumachen. Außerdem war das Hintergrundsignal äußerst schwach und die gemessene Intensität dem gemäß auch sehr unsicher. Es gilt jedoch als sehr wahrscheinlich, dass diese Strahlung von jungen Galaxien stammt, die von uns mehrere Milliarden Lichtjahre entfernt sind.

Es gibt nur noch ein weiter entferntes Signal, das der kosmischen Hintergrundstrahlung. Es hat sein Maximum allerdings im Millimeterbereich und stammt aus einer sehr frühen Phase, wenige hunderttausend Jahre nach dem Urknall. Diese Strahlung hat das Satellitenteleskop COBE Anfang der 90er Jahre am gesamten Himmel genau vermessen.

Will man den extragalaktischen Hintergrund der jungen Galaxien beobachten, so muss man Himmelsbereiche wählen, die möglichst frei von den anderen erwähnten Vordergrundquellen sind. Hier bieten sich unterschiedliche Regionen weit außerhalb der Milchstraßenebene an, wo der interstellare Staub sehr dünn ist.

Mit dem am MPIA gebauten Instrument ISOPHOT wurden vier große Beobachtungsprojekte zum extragalaktischen Hintergrund ausgeführt, deren erste Ergebnisse im Berichtsjahr erschienen. Sie weisen deutlich auf eine heftige Entwicklung der Galaxien im frühen Universum hin.

Die extragalaktische Hintergrundstrahlung

Erst Mitte der neunziger Jahre, als Beobachtungen im fernen Infrarot und Submillimeterbereich ausreichend empfindlich wurden, trat immer deutlicher hervor, dass man die Sternentstehungsrate im frühen Universum unterschätzt hatte. Diese hatte man bis dahin überwiegend aus Beobachtungen im optischen und UV-Bereich abgeleitet. Hier treten normalerweise junge, heiße Sterne dominant hervor. Allerdings sind Sternentstehungsgebiete von großen Staubmengen umgeben, die das Sternlicht effektiv absorbieren. Dabei erwärmt sich der Staub und beginnt im

Infraroten zu leuchten. Von nahen normalen Spiralgalaxien ist bekannt, dass sie bereits etwa 30 % ihrer gesamten Leuchtkraft im Infrarot abstrahlen. In Systemen mit intensiver Sternentstehung (Starburst-Galaxien) kann der Infrarotanteil an der gesamten Leuchtkraft sogar 95 % erreichen. Man vermutet, dass diese Galaxien mit den so genannten Ultra Luminous Infrared Galaxies (ULIRGs) identisch sind (vgl. Kap. II.2 in diesem Jahresbericht). Das Intensitätsmaximum liegt meist bei 50 μm bis 100 μm Wellenlänge. Bei jungen Galaxien verschiebt sich dieses Maximum wegen der kosmologischen Rotverschiebung noch weiter ins ferne Infrarot und bis in den Submillimeterbereich hinein. Die meisten dieser Objekte sind wegen der starken Staubabsorption vermutlich im Optischen gar nicht sichtbar.

Mit ISOPHOT bot sich die Möglichkeit, die Galaxien im jungen Universum detailliert zu studieren. Der große Vorteil von ISOPHOT gegenüber COBE war sein wesentlich höheres Auflösungsvermögen von etwa zwei Bogenminuten bei 170 μm Wellenlänge und die Möglichkeit, geeignete Himmelsareale gezielt anzuvisieren, in denen die störende Vordergrundstrahlung des Zirkus vergleichsweise gering ist. Hiermit ließen sich die Fragen nach dem Strahlungsfluss bei großen Wellenlängen und die Anzahl der nachweisbaren Einzelobjekte angehen. Die neuen Daten dienen zudem als Grundlage für weitere Beobachtungen im Submillimeterbereich.

Die ISOPHOT-Beobachtungsprojekte

Im Rahmen der Erforschung der extragalaktischen Hintergrundstrahlung wurden vier große Projekte durchgeführt, von denen hier zwei näher besprochen werden. Zunächst stellen wir die Beobachtungsergebnisse vor, anschließend folgt die gemeinsame Interpretation der Daten.

1. Das größte Himmelsfeld wurde im Rahmen des FIRBACK (Far Infrared Background) beobachtet. Hieran sind Astronomen aus Frankreich, Italien, Großbritannien, Deutschland und den USA beteiligt. In etwa 150 Stunden Beobachtungszeit wurde bei 170 μm ein insgesamt vier Quadratgrad großes Gebiet untersucht (Abb. IV.33). Die einzelnen Felder lagen weit außerhalb der Milchstraßenebene und waren möglichst frei von störendem Zirkus. Dennoch bedeutete es einen großen Aufwand, die punktförmigen Quellen zweifelsfrei zu identifizieren und deren Intensitäten zu messen. Schließlich fanden sich 196 Quellen mit Intensitäten zwischen 180 und 500 mJy.

2) Gemeinsam mit Astronomen aus Helsinki hat das MPIA das Projekt ISOPHOT CIRB (Cosmic Infrared Background Radiation) unternommen. Acht Himmelsgebiete mit einer Gesamtfläche von etwa 1.5 Quadratgrad wurden im Rahmen dieses Projekts bei Wellenlängen von 90, 150 und 180 μm aufgenommen (Abb. IV.34). Das Ziel war, die Anzahl der Objekte und deren Helligkeiten zu ermitteln. Hierbei taucht das grundsätzliche Problem auf, dass der Infrarotzirkus den Nachweis der Galaxien stört. Auf Grund

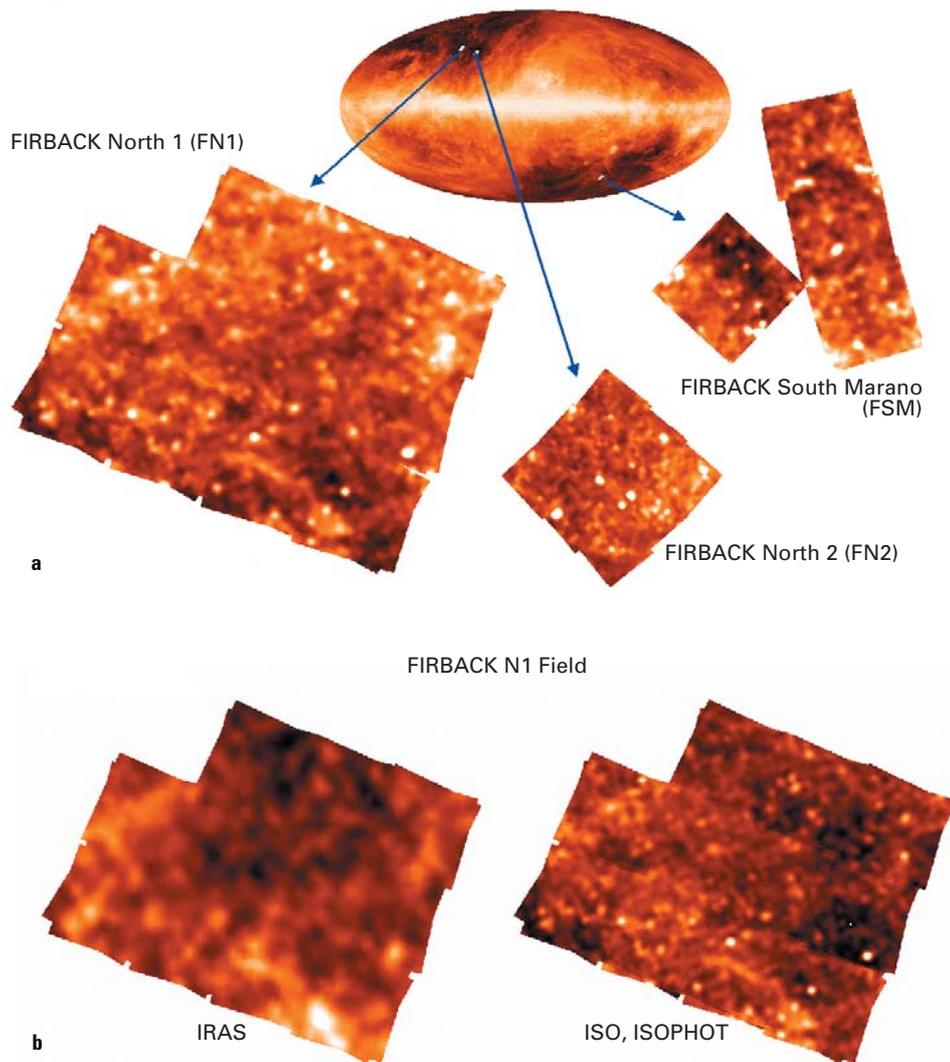


Abb. IV.33 a): Die Positionen der FIRBACK-Felder am Himmel. Sie befinden sich alle bei hohen galaktischen Breiten. **b)** Das selbe Himmelsfeld, links aufgenommen mit IRAS, rechts mit ISOPHOT.

anderer Beobachtungen war aber klar, dass in den ausgewählten Feldern der Zirkus so dünn ist, dass er die Beobachtungen nicht wesentlich stören kann. Es ist zudem möglich, die Zirkusemission von derjenigen des extragalaktischen Hintergrunds zu trennen, weil sie in den drei gemessenen Wellenlängenbereichen unterschiedliche Strahlungstemperaturen und damit auch unterschiedliche Intensitätsverteilungen aufweisen. Bei der Datenanalyse wurde später außerdem noch zwischen Quellen unterschieden, die nur bei einer Wellenlänge auftauchen und solchen, die auf mindestens zwei Aufnahmen erscheinen. Die Unterschiede waren allerdings nicht gravierend, was das Vertrauen in die angewandte Methode der Analyse gestärkt hat. Insgesamt fanden sich 55 punktförmige Objekte. Sie lassen sich nicht mit bekannten Objekten identifizieren. Es

ist daher wahrscheinlich, dass es sich ausschließlich um ferne Galaxien handelt.

Gleichzeitig wurden der European Large Area ISO Survey (ELAIS) bei $90\ \mu\text{m}$ Wellenlänge sowie der Survey bei $60\ \mu\text{m}$ und $90\ \mu\text{m}$ in dem Gebiet Selected Area 57 durchgeführt. Sie werden hier nicht behandelt.

Die hierarchische Entwicklung des Universums

In den Projekten FIRBACK und ISOPHOT CIRB konnte also, wie gezeigt, erstmals die Hintergrundstrahlung in einzelne Quellen aufgelöst und die Helligkeiten der fernen, punktförmigen Galaxien im fernen Infrarot gemessen werden. Eine genaue Analyse ergab, dass etwa 15 % der von COBE gemessenen, diffusen Hintergrundstrahlung von den jungen Galaxien stammt. Tatsächlich ist der Anteil wahrscheinlich noch höher, denn auch bei ISOPHOT blieb ein erheblicher Rest der Ferninfrarotstrahlung räumlich aufgelöst. Woher er stammt, müssen zukünftige Weltraummissionen ergründen. Hier sind auch »exotische« Prozesse,

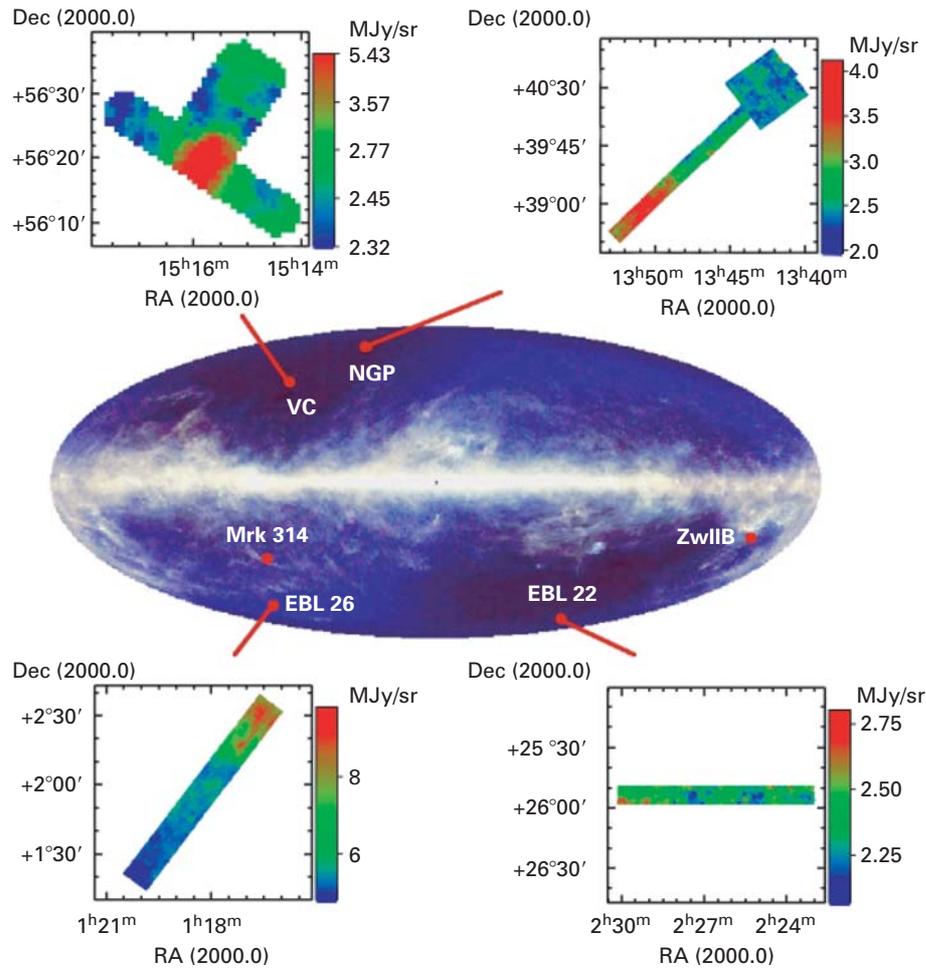


Abb. IV.34: Vier ISOPHOT-CIRB-Felder am Himmel.

wie der Zerfall von Teilchen im frühen Universum, nicht ausgeschlossen.

Mit den neuen Daten ergab sich nun die Möglichkeit, Modelle zu prüfen, die unterschiedliche Szenarien der Galaxienentwicklung durchspielen. In Italien und Frankreich erarbeiteten kürzlich zwei Theoriegruppen solche Modelle, mit denen die Astronomen nun ihre neuen Messdaten verglichen. Die Simulationen verfolgen zunächst, wie sich große Gaswolken unter der eigenen Schwerkraft zu den späteren Galaxien zusammenziehen. Dann verdichten sich kleinere Bereiche darin zu den Sternen. In den Modellen wird die Sternentstehungsrate proportional zur noch vorhandenen Gasmasse angenommen. In jeder Galaxie bilden sich Sterne mit einer ausreichend gut bekannten Massenfunktion. Auch sekundäre Effekte wie Supernova-Explosionen werden mit einbezogen.

Daraus ergibt sich das von allen Sternen einer Galaxie gemeinsam abgegebene Strahlungsfeld. Das wird zum Teil von Staub absorbiert und im Infraroten wieder emittiert. Bis zu diesem Punkt sind die Modelle analytisch. Nun gibt es aber weitere Aspekte, die sich nicht aus den Modellen ergeben, sondern die auf Grund von Beobachtungshinwei-

sen »von Hand« eingesehen werden müssen. Hierzu zählt vor allem das Verschmelzen von Galaxien und eine daraus resultierende stark erhöhte Rate der Sternentstehung.

In den vergangenen Jahren hat es sich immer deutlicher herausgestellt, dass die gravitative Wechselwirkung und das Verschmelzen von Galaxien im frühen Universum eine entscheidende Rolle gespielt haben. Die derzeit von vielen Kosmologen favorisierte Theorie der Galaxienentwicklung basiert auf einem so genannten hierarchischen Aufbau. Demnach gab es anfänglich im Universum mehr Galaxien als heute, sie waren aber kleiner. Die damalige Galaxiendichte muss demnach wesentlich höher gewesen sein als heute, so dass die Sternsysteme häufig miteinander verschmolzen. Daraus entstanden die großen Galaxien, wie wir sie im heutigen Universum beobachten. Wenn zwei Galaxien miteinander verschmelzen, wird die interstellare Materie zum Teil verdichtet, und es setzt heftige Sternentstehung ein: Es entstehen viele Starburst-Galaxien.

Die Theorie des hierarchischen Aufbaus wird durch unterschiedliche Beobachtungen gestützt, gilt indes nicht als endgültig gesichert. Durch den Vergleich der neuen ISO-Daten mit den Modellen bestanden gute Chancen, diese Frage weiter zu klären. Es hatte sich nämlich in den theoretischen Arbeiten eindeutig gezeigt, dass die Modelle sich in ihren Voraussagen mit zunehmender Wellenlänge

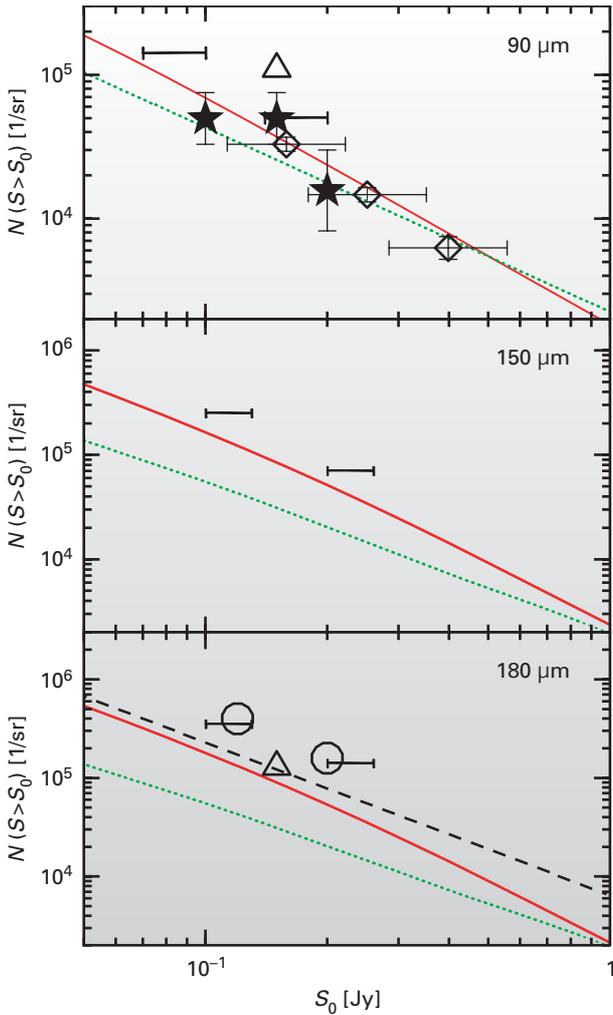


Abb. IV.35: Vergleich der in CIRB gemessenen Galaxiendichte in den drei Wellenlängenbereichen mit den Voraussagen der Modelle.

immer stärker voneinander unterscheiden. Ursache hierfür sind die Starburst-Galaxien, die den überwiegenden Teil ihrer gesamten Leuchtkraft im fernen Infrarot abstrahlen, wie weiter unten gezeigt wird.

Abb. IV.35 zeigt den Vergleich der in ISOPHOT CIRB gemessenen Galaxiendichte in den drei Wellenlängenbereichen mit den Voraussagen der Modelle. Bei 90 μm sind die Messwerte im Rahmen der Ungenauigkeiten mit allen Modellen verträglich. Mit zunehmender Wellenlänge kristallisiert sich aber heraus, dass ein Modell ohne Verschmelzen von Galaxien (gepunktete Linie) ausgeschlossen werden kann. Bei 180 μm gibt es mindestens zehnmal mehr Infrarotquellen als von diesem Modell vorausgesagt.

Sehr viel besser passen zwei Modelle, die auf unterschiedliche Weise die Wirkung von Starburst-Galaxien bzw. ULIRGs berücksichtigen. In einem Fall (durchgezogene Linie) wurde angenommen, dass ihre Zahl mit wachsender Rotverschiebung zunimmt. Das stimmt also mit dem hierarchischen Modell überein, wonach die Anzahl verschmelzender Galaxien und damit die Zahl der ULIRGs mit

zunehmendem Alter des Universum abnimmt. In dem anderen Modell (gestrichelt) wurden zusätzlich staubreiche Galaxien mit hoher Sternentstehungsrate bei niedrigen Rotverschiebungen angenommen.

Die Daten sprechen eindeutig für die beiden letzten Modelle. Auch lässt sich die Intensitätsverteilung zwischen 90 μm und 180 μm durchaus als Summe der Strahlung einzelner infrarotleuchtkräftiger Galaxien mit Rotverschiebungen zwischen $z = 0.5$ und $z = 1$ erklären. Normale Elliptische und Spiralgalaxien jedenfalls können die Ferninfrarotdaten nicht erklären.

Abb. IV.36 zeigt im Vergleich zu den Voraussagen der unterschiedlichen Modellszenarien die in FIRBACK gemessene Galaxiendichte bei 170 μm . Auch hier übersteigt die Zahl der Galaxien die Voraussage des Modells ohne ULIRGs (gepunktet, unten) um das Zehnfache. Selbst bei Hinzunahme einer mit der Rotverschiebung wachsenden ULIRG-Population (durchgezogen, Mitte) liegen die Messdaten noch um einen Faktor zwei über dem Modell. Erst wenn man die Zahl der ULIRGs im frühen Universum noch erhöht, stimmen Modell und Messdaten gut überein (gestrichelt, oben).

Damit ist die Frage nach der Entwicklung der Galaxien im Universum sicherlich noch nicht abschließend geklärt. Es ist nämlich durchaus möglich, dass unterschiedliche Modelle zu sehr ähnlichen Voraussagen für die Intensitätsverteilung der extragalaktischen Hintergrundstrahlung führen. Dennoch sind die Astronomen einen entscheidenden Schritt voran gekommen, indem sie einige Szenarien mit großer Sicherheit ausschließen konnten.

Die neuen ISOPHOT-Daten werden nun als Katalog für Nachfolgebeobachtungen mit unterschiedlichen Teleskopen dienen. Möglich sind derzeit Messungen im Submillimeterbereich, etwa mit SCUBA am James-Clerk-Maxwell-Teleskop oder mit MAMBO am deutsch-französischen IRAM. Zukünftig setzen die Astronomen ihre Hoffnungen auf das flugzeuggetragene Infrarotteleskop SOFIA und das europäische Weltraumteleskop HERSCHEL, an dem auch Astronomen des MPIA beteiligt sind (s. Kapitel III).

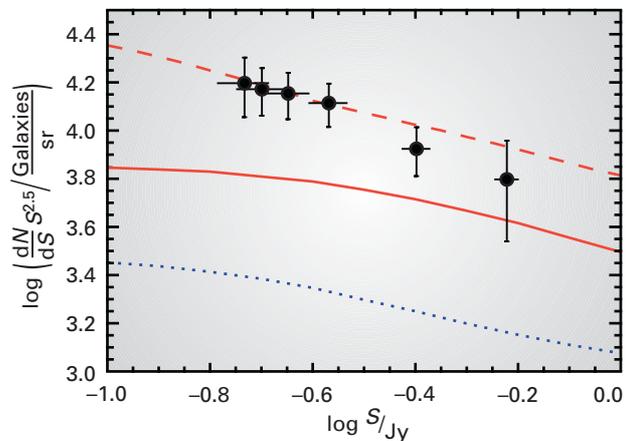


Abb. IV.36: Vergleich der mit FIRBACK gemessenen Galaxiendichte bei 170 μm mit den Voraussagen der Modelle.

ISO belegt Vereinheitlichung von Radiogalaxien und radiolauten Quasaren

Seit Jahrzehnten untersuchen Astronomen Galaxien mit aktiven Kernen. Mittlerweile lassen sich anhand ihrer Beobachtungsmerkmale etwa ein Dutzend verschiedener Typen unterscheiden. Hierzu zählen zum Beispiel Seyfert-Galaxien vom Typ 1 und 2, BL-Lac-Objekte, radioleise und radiolauter Quasare und Radiogalaxien. Seit Ende der achtziger Jahre kommen jedoch immer mehr Astrophysiker zu der Überzeugung, dass diese Typen im Prinzip alle einheitlich aufgebaut sind und dass ihr beobachtetes Erscheinungsbild, da sie nicht kugelsymmetrisch sind, mit dem Blickwinkel, unter dem sie gesehen werden, variiert. Das wesentliche Strukturelement des vereinheitlichten Modells ist ein dichter Staubtorus, der das zentrale Schwarze Loch in den Galaxien umgibt und es verdeckt, wenn man von der Seite schaut. Astronomen des MPIA gelang jetzt gemeinsam mit Kollegen der Universität Bochum der erste Nachweis solcher Tori im Infraroten, der für die heiß diskutierte Vereinheitlichung der beiden Typen der radiolauten Quasare und der Radiogalaxien spricht. Die Studie gründet auf hoch empfindlichen Daten aus dem ISO-Archiv. Sie zeigt, welche Möglichkeiten die kürzlich genehmigte 5- bis 6-jährige aktive Archivphase des ISOPHOT-Datenzentrums bietet.

Das Vereinheitlichte Modell

Das Modell zur einheitlichen Beschreibung Aktiver Galaxien basiert auf wenigen grundlegenden Komponenten (Abb. IV.37, oben): Im Zentrum der Galaxie sitzt ein Schwarzes Loch mit mindestens einer Million Sonnenmassen, das aus der Umgebung Materie anzieht. Durch Reibung und andere Vorgänge verliert die Materie an Bewegungsenergie und strudelt langsam in das Schwarze Loch hinein. Hierbei entsteht in dem heißen Gas energiereiche Strahlung, vor allem im Röntgen-, UV- und sichtbaren Bereich.

Unterstützt durch starke Magnetfelder können gleichzeitig senkrecht zur Scheibenebene zwei Gasströme in entgegengesetzten Richtungen nahezu mit Lichtgeschwindigkeit ins All hinausschießen. Diese Jets enden häufig durch die Wechselwirkung mit Gas weit außerhalb der Galaxie in ausgedehnten Blasen, die im langwelligen Radiobereich sehr hell strahlen. Im Innern der Jets bewegen sich Elektronen nahezu mit Lichtgeschwindigkeit. Sie laufen dabei auf kornenzieherähnlichen Bahnen entlang der Magnetfeldlinien vom Schwarzen Loch fort und geben dabei in Bewegungsrichtung Synchrotronstrahlung ab. Das Besondere dieser kurzwelligen Radiostrahlung ist ihre Anisotropie. Sie bildet einen Kegel, ähnlich dem eines Autoscheinwerfers, mit dem Jet als Mittelachse.

Im Vereinheitlichten Modell wird nun die unterschiedliche Erscheinungsweise Aktiver Galaxien als rein geometrischer Effekt gedeutet. Je nach dem Blickwinkel, unter dem man eine solche radiolauter Galaxie sieht, wird das beobachtete Strahlungsspektrum durch verschiedene Komponenten des komplexen Systems dominiert. Weist einer der Jets unmittelbar auf die Erde zu, so dominiert die von den Elektronen emittierte Synchrotronstrahlung, und das kurzwellige Radiospektrum ist sehr hell. Dies wird beispielsweise bei BL-Lac-Objekten beobachtet. Schaut man unter einem größeren Winkel auf die Jetachse, so dominiert die langwellige Strahlung der Radioblasen, wie in der Mehrzahl der radiolauten Quasare und in Radiogalaxien beobachtet.

Bei Radiogalaxien besteht kein Zweifel an der Existenz eines Schwarzen Loches, da man nur so die Jets erklären kann. Allerdings zeigt nur ein Bruchteil der Radiogalaxien die beobachteten optischen Merkmale der radiolauten Quasare, nämlich breite Spektrallinien und hohe Leuchtkräfte. Die große Herausforderung besteht darin, zu prüfen, ob Radiogalaxien – zumindest die mit besonders leuchtkräftigen Radioblasen – eigentlich nichts anderes sind als radiolauter Quasare, bei denen lediglich der Kern im Optischen nicht sichtbar ist.

Um dies im Rahmen des Vereinheitlichten Modells zu erklären, wurde bereits 1989 in einer heiß diskutierten Vermutung die Existenz einer weiteren Komponente postuliert: eines dicken Staubrings von 10 bis zu 100 Lichtjahren Durchmesser, der das Schwarze Loch und die zentrale aktive Zone umgibt. Schaut man direkt auf die Kante dieses Torus, so verdeckt er das Schwarze Loch. Damit das Modell funktioniert, muss der Staubtorus das Licht um bis zu 50 Größenklassen, entsprechend einem Faktor 10^{-20} , abschwächen. Dann nämlich lässt sich beim Blick auf die Kante des Torus die für Quasare typische optische und UV-Strahlung nicht mehr nachweisen.

Dieses Vereinheitlichte Modell gilt in Fachkreisen als sehr attraktiv, da es die Vielzahl Aktiver Galaxien auf ein gemeinsames Grundschema zurückführt. Es ist z.B. für die Vereinheitlichung der Seyfert-Galaxien vom Typ 1 und 2 weitgehend akzeptiert. Aber für die radiolauten Quasare und Radiogalaxien gilt es keineswegs als gesichert. Zum einen sind die zentralen Komponenten so klein, dass sie selbst mit höchstauflösenden Instrumenten nicht erkennbar sind. Es gibt lediglich indirekte Hinweise auf absorbierenden Staub in der Umgebung des Schwarzen Lochs. Zum anderen erscheint einigen Astronomen das Modell als zu stark vereinfachend. Es berücksichtigt nicht den Entwicklungszustand der Radioblasen oder die zirkumgalaktische Umgebung oder, dass sich die zentrale Maschinerie in unterschiedlichen physikalischen Zuständen befinden kann. So kann die Fütterungsrate des Schwarzen Lochs oder die Materieausströmung im Jet von Objekt zu Objekt schwanken.

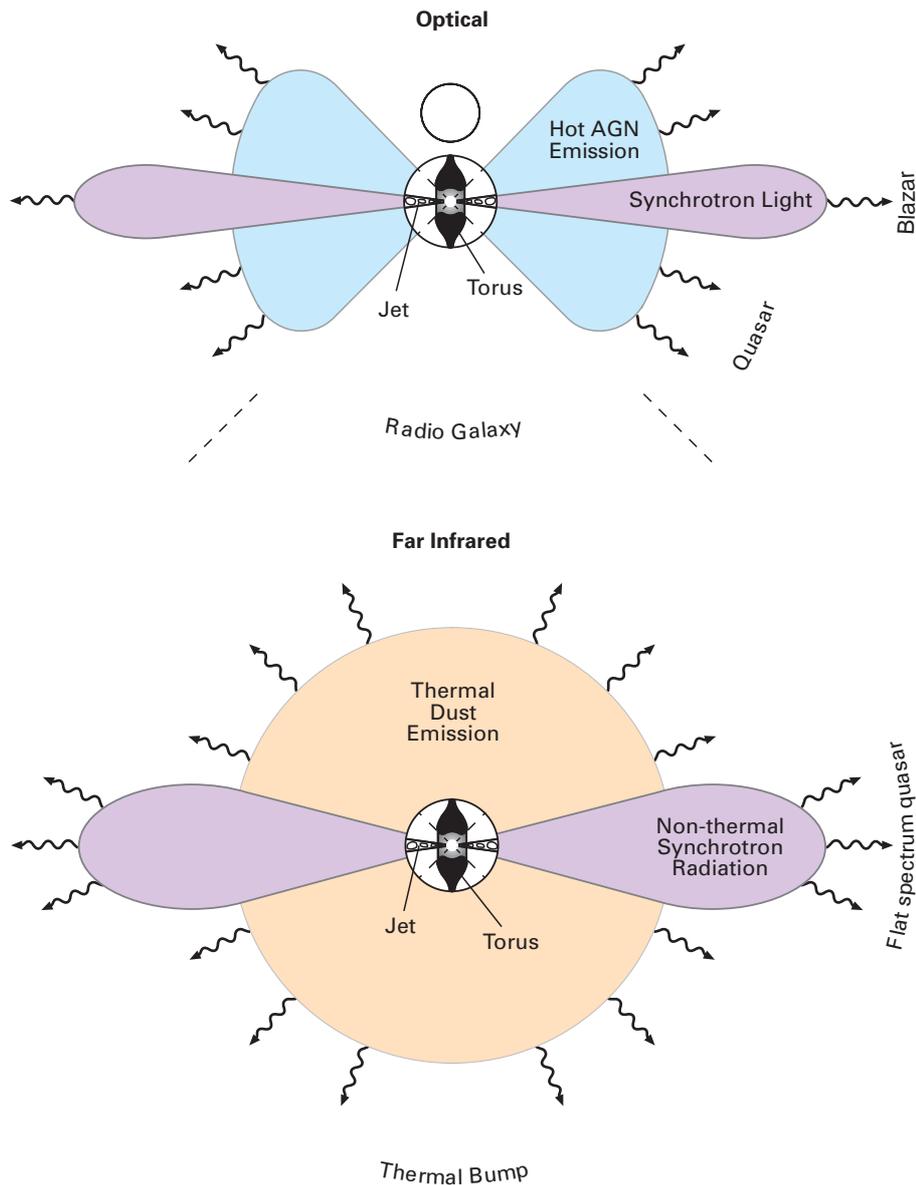


Abb. IV.37: Das Vereinheitlichte Modell für Aktive Galaxien. Im optischen Bereich (oben) sind das Schwarze Loch und die es umgebende heiße Scheibe von der Seite nicht sichtbar, weil dichter Staub die Sicht verdeckt. Im fernen Infrarot (unten) strahlt der Staub isotrop. In diesem Wellenlängenbereich sehen also alle Systeme aus allen Richtungen gleich aus.

Infrarotbeobachtungen mit ISOPHOT

Mit Beobachtungen im Infraroten lässt sich das Vereinheitlichungsmodell sehr elegant überprüfen. Das optische Licht aus dem Zentralbereich ist zwar bei dem Blick auf die Kante des Torus nicht sichtbar, aber es heizt den postulierten Staub, der nun seinerseits Infrarotstrahlung in alle Richtungen gleichmäßig (isotrop) abgibt (Abb. IV.37, unten). Bei Wellenlängen ab etwa $20 \mu\text{m}$ sollte selbst die dichte Staubscheibe durchlässig werden, so dass man

erwartet, bei Quasaren und Radiogalaxien mit gleicher isotroper Leuchtkraft der Radioblasen auch im mittleren und insbesondere im fernen Infrarot die gleiche thermische Strahlungsintensität zu beobachten.

Bereits Anfang der 90er Jahre wurden Versuche unternommen, das Vereinheitlichungsmodell anhand von Daten des Infrarotsatelliten IRAS zu verifizieren. Die Ergebnisse blieben jedoch mangels ausreichender Empfindlichkeit und Wellenlängenüberdeckung unschlüssig. Es war nicht möglich, zwischen thermischer Komponente und Synchrotronstrahlung zu unterscheiden, und teilweise widersprachen die Beobachtungen sogar dem Vereinheitlichten Modell.

Die neue Untersuchung mit ISOPHOT zwischen $5 \mu\text{m}$ und $180 \mu\text{m}$ fand im Rahmen des ISO European Central Quasar Programme statt. Zehn Quasare und zehn dazu passende Radiogalaxien wurden aus dem 3. Cambridge-Katalog bei 178 MHz ausgewählt, d.h. bei einer Wellenlänge,

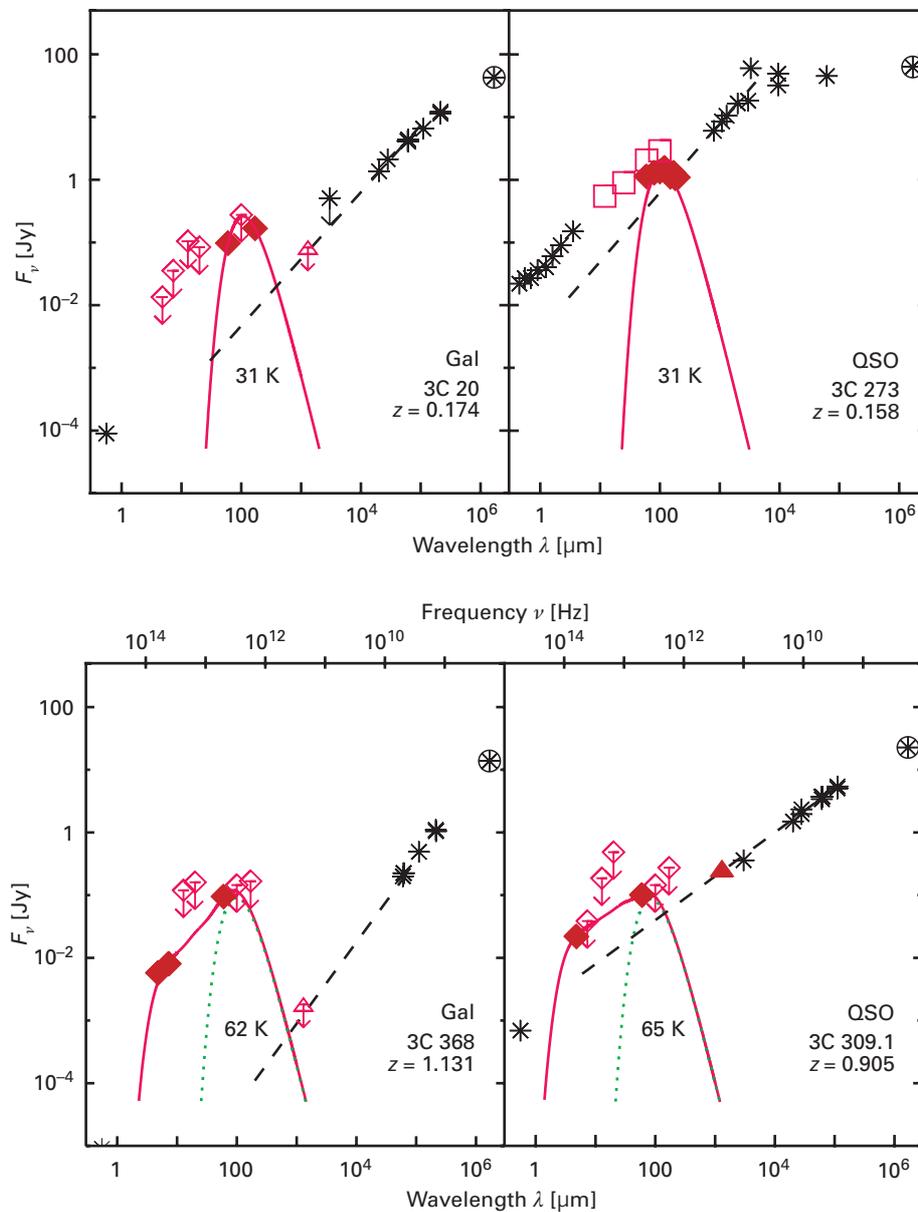
wo die isotrope Strahlung der Radioblasen (und nicht die der Jets) dominant ist. Es wurden jeweils Quasar-Radiogalaxien-Paare mit gleicher Rotverschiebung und Leuchtkraft bei 178 MHz verglichen, um kosmische Entwicklungseffekte möglichst auszuschließen. Die Paare weisen Rotverschiebungen zwischen $z = 0.05$ und $z = 2$ auf. Sie stehen demnach in ganz unterschiedlichen Entfernungen, sprich unterschiedlichen kosmischen Epochen.

Zusätzlich wurden sieben Objekte mit dem deutsch-französischen Teleskop IRAM auf dem Pico Veleta bei einer Wellenlänge von 1.3 mm beobachtet. Zusammen mit früher gemessenen Daten aus dem optischen und Radiobereich ließ sich so die spektrale Energieverteilung über einen großen Wellenlängenbereich ermitteln. Erste Ergebnisse anhand von einigen Einzelobjekten wurden bereits im Jahresbericht 1998 vorgestellt. Sie erlaubten jedoch noch nicht die generelle Vereinheitlichung der Radiogalaxien

mit den radiolauten Quasaren. Dieser noch offene Teil gelang jetzt erstmalig:

Die hohe Nachweisempfindlichkeit von ISOPHOT und die Qualität der spektralen Energieverteilungen erlaubt es zweifelsfrei, die thermische Staubkomponente vom Synchrotronanteil zu unterscheiden. Dies zeigt Abb. IV.38 exemplarisch für zwei Paare. Hier sind deutlich zwei verschiedene Strahlungsquellen erkennbar: Zum einen Synchrotronstrahlung, deren Intensität vom Radiobereich bis zum fernen und mittleren Infraroten stetig abnimmt. Sie stammt von Elektronen, die in Magnetfeldern beschleunigt werden. Interessanterweise zeigen die Quasare ein flacheres Synchrotronpektrum als die Radiogalaxien. Dies passt

Abb. IV.38: Spektrale Energieverteilungen der zwei Paare: 3C 20 und 3C 273 sowie 3C 368 und 3C 309.1.



genau zu den Vorhersagen des Vereinheitlichungsmodells, denn in den Radiogalaxien ist die vorwärts gerichtete Strahlung des Jets weniger auf den Beobachter orientiert und daher schwächer.

Zum anderen ist in allen Radiogalaxien und in mindestens vier Quasaren auch eine thermische Komponente nachweisbar – als deutlicher Buckel über dem glatten Synchrotronspektrum. Diese thermische Komponente hat ein Maximum im mittleren bis fernen Infrarot und stammt von Staub mit Temperaturen zwischen 30 K und mehreren hundert K. Die Leuchtkräfte und ihre unteren Grenzen liegen alle im Bereich zwischen 10^{11} und 10^{14} Sonnenleuchtkräften, wie er auch typisch ist für radioleise Quasare (s. Jahresbericht 1999, S.72). Selbst in den drei Fällen, in denen die thermische Komponente nicht deutlich als Buckel über dem Synchrotronspektrum erkennbar ist, erlauben die unteren Grenzwerte noch die Existenz einer Staubkomponente mit quasartypischer Leuchtkraft.

Sowohl statistisch als auch im paarweisen Vergleich zeigen die beiden Objekttypen Radiogalaxien und radiolauten Quasare im Infrarot- bis Millimeterbereich prinzipiell die gleichen Eigenschaften – genau so, wie es das Vereinheitlichte Modell vorhersagt.

Entwicklungseffekte

Das Vereinheitlichte Modell ließ sich sogar noch weitergehend testen. Wenn die Beziehung zwischen Radiogalaxien und radiolauten Quasaren ausschließlich durch die geometrische Vereinheitlichung bestimmt ist, und nicht zusätzlich durch die kosmische Entwicklung oder das zirkumgalaktische Medium, dann sollte für Quasare und Ra-

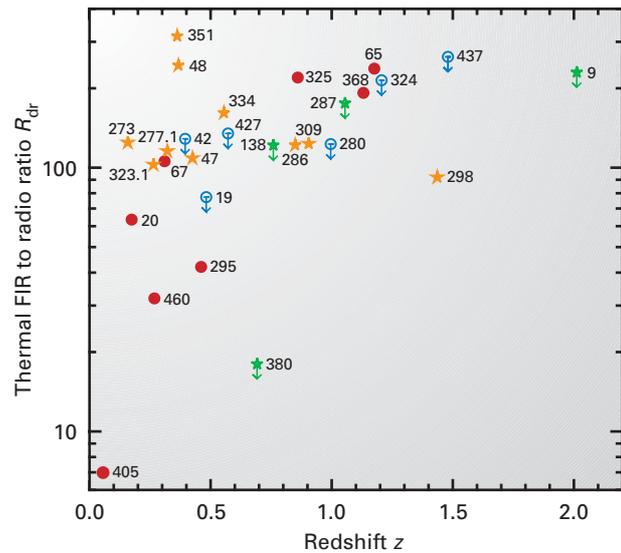
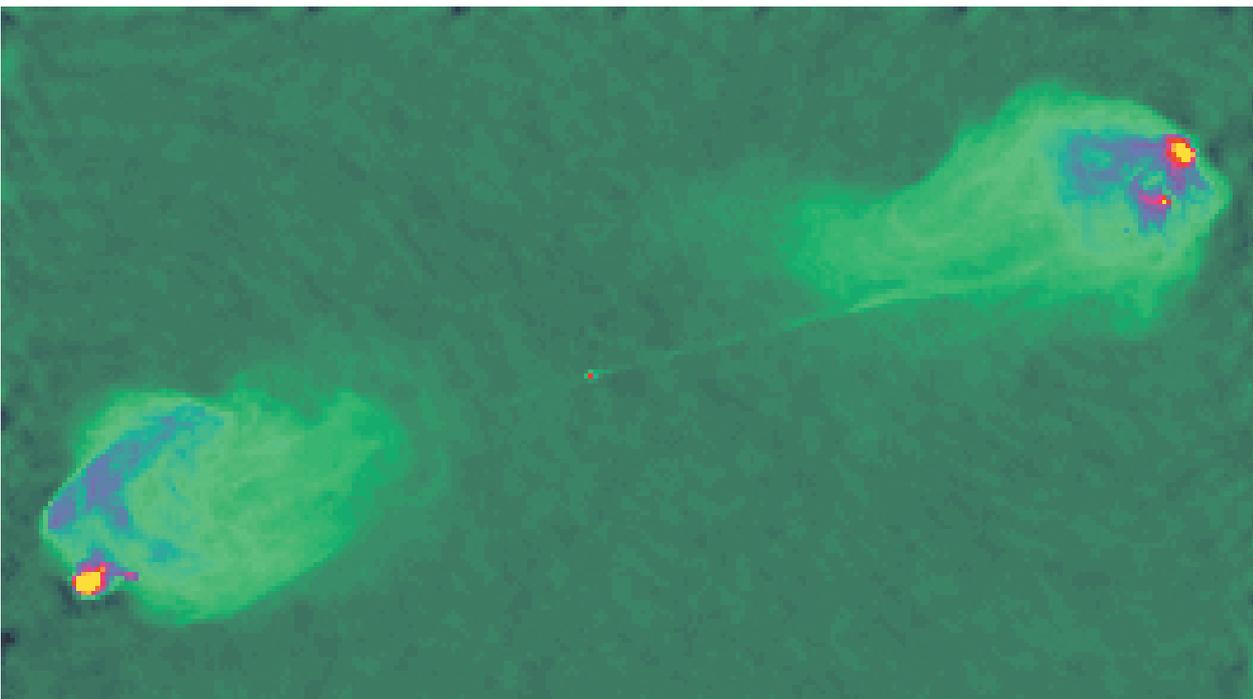


Abb. IV.39: Verhältnis der Leuchtkräfte im fernen Infrarot und im Radiobereich in Abhängigkeit von der Rotverschiebung z .

diogalaxien die Strahlungsintensität im fernen Infrarot bei identischer Kernaktivität gleich sein. Letztere lässt sich indes nicht direkt messen. Es ist aber plausibel, dass mit wachsender Aktivität in der Nähe des Schwarzen Loches auch die Jet-Aktivität steigt. Die wiederum spiegelt sich in der Radiostrahlung der Blasen wider, die durch die Jets mit Energie versorgt werden. In einfachster Näherung sollte das Intensitätsverhältnis der Strahlung im fernen Infrarot und im Radiobereich bei allen Quellen etwa gleich sein.

Abb. IV.40: Radioaufnahme von Cygnus A. (Bild: VLA)



Wie Abb. IV.39 zeigt, bleibt dieses Verhältnis, abgesehen von wenigen Ausnahmen, bis auf einen Faktor 2 bis 3 konstant. Diese geringe Streuung des Infrarot/Radio-Leuchtkraftverhältnisses spricht ebenfalls für die prinzipiell führende Rolle der geometrischen Vereinheitlichung bei der Beschreibung der Beziehung zwischen Radiogalaxien und radiolauten Quasaren. Bei Ausnahmefällen müssen auch andere Effekte mit in Betracht gezogen werden – eine Tatsache, die bei der Komplexität der Objekte sicherlich nicht verwunderlich ist. Die Trennung der verschiedenen Effekte bleibt weiterhin eine Herausforderung für die zukünftige Forschung.

Prominentestes Beispiel für einen sehr ungewöhnlichen Fall ist 3C 405, besser bekannt als Cygnus A (Abb. IV.40). Es ist die zuerst entdeckte Radiogalaxie und mit einer Rotverschiebung von $z = 0.056$ auch die nächstgelegene. Wir blicken von der Seite auf diese Galaxie, deren Radiostrahlung aus zwei riesigen Blasen kommt. Damit ist sie der klassische Vertreter der Radiogalaxien. Doch schon 1998 konnten Astronomen des MPIA zeigen, dass auch Cygnus A ein Quasar ist, dessen Kerngebiet durch dichte Staubwolken verdeckt wird (s. Jahresbericht 1998, S. 22). Dennoch sieht es so aus, als werde – bedingt durch ein relativ dichtes zirkumgalaktisches Medium – die Jet-Energie sehr effizient in eine hohe Leuchtkraft der Radioblasen umgewandelt und als sei deshalb das Verhältnis der Leuchtkraft im Infraroten zu der im Radiobereich extrem niedrig (Abb. IV.39).

Abb. IV.39 zeigt ferner einen leichten Trend: Das Intensitätsverhältnis der thermischen Infrarotstrahlung zur Radiostrahlung steigt mit wachsender Rotverschiebung an. Die Datenmenge ist noch zu klein, um diesen Trend als signifikant einzustufen. Dennoch könnte sich hierin ein Entwicklungseffekt andeuten. Im frühen Universum ($z > 1$) waren die Galaxien noch enger beisammen, und es ereigneten sich häufiger nahe Vorbeiflüge und Zusammenstöße.

Solche Ereignisse haben wahrscheinlich dazu geführt, dass vermehrt Materie in die Zentren der Galaxien strudelte und in den Schwarzen Löchern verschwand. Dadurch erhöhte sich auch die UV-Strahlung im Kernbereich und damit die beobachtbare Intensität im Infrarot. Damit muss aber nicht eine verstärkte Jet-Aktivität einhergegangen sein. Sie wird vermutlich stärker durch die Eigenschaften des Schwarzen Lochs, wie Masse und Drehimpuls, bestimmt.

Im frühen Universum war demnach in Quasaren und Radiogalaxien die UV- und damit auch die Infrarotstrahlung erhöht, nicht aber die Radiostrahlung. Das Universum dehnte sich mit zunehmendem Alter immer mehr aus und Wechselwirkungen zwischen Galaxien wurden seltener. Damit verringerte sich die »Fütterungsrate« der Schwarzen Löcher, und die Kernaktivität in der umgebenden Scheibe ließ nach. Sie reicht aber immer noch aus, um die Radiojets mit energiereichen Teilchen zu versorgen und die Radioblasen zum Leuchten zu bringen.

Die Idee, dass die Schwarzen Löcher in den Zentren der Galaxien mit zunehmendem Alter an »Nahrungsmittelknappheit« leiden, passt auch zu anderen Beobachtungen. So fanden amerikanische Astronomen bei Beobachtungen im Optischen, dass die Quasardichte bei einer Rotverschiebung um $z = 3$ (damals betrug das Alter des Universums etwa zehn Prozent des heutigen Weltalters) ihren Höchststand hatte und seitdem abnimmt.

In nächster Zukunft wollen die Astronomen des MPIA den Staubtorus in den Zentren aktiver Galaxien erstmals direkt beobachten. Hierfür wollen sie die neuen Instrumente des Very Large Telescope nutzen. Große Hoffnungen setzen sie hierbei auf die kurz vor dem Einsatz befindliche Infrarotkamera CONICA, die derzeit unter der Leitung des MPIA entsteht, und auf das Infrarot-Interferometer MIDI, an dessen Bau und Entwicklung Forscher des Instituts ebenfalls maßgeblich beteiligt sind.

Personal

In Heidelberg

Direktoren: Appenzeller (Kommissarische Leitung bis 31.7.), Beckwith (beurlaubt), Rix (Geschäftsführung ab 1.8.) Elsässer (em.), Münch (em.).

Wissenschaftliche Mitarbeiter: Abraham, Bailer-Jones, Beetz, Bianchi (bis 30.6.), Birkle, Burkert, Dehnen, Feldt, Fried, Graser, Grebel (ab 1.5.), Haas, Heraudeau, T. Herbst, Hippelein, Hofferbert, Ibata (bis 30.9.), Kasper (15.8.–31.10.), Kiss (1.3.–31.8.), Klaas, Kley, Kümmel, Kroupa (17.7. bis 31.10.), Leinert, Lemke, Lenzen, Ligori, Marien, Meisenheimer, Mundt, Neckel, Odenkirchen (ab 1.5.), Röser, Slyz, Staude, Stickel, Wolf, Wilke.

Doktoranden: Dib (ab 1.10.), Geyer, Harbeck (ab 1.5.), Hartung, Heitsch, Hetznecker, Hotzel, Jesseit (ab 1.5.), Jester, Khochfar (ab 1.6.), Kasper (bis 14.8.), Kleinheinrich, Kranz, Krause (ab 1.5.), Krdzalic (ab 18.9.), Kuhlmann (bis 31.10.), Lamm (ab 15.9.), Lang, Maier, Mühlbauer (ab 1.7.), Naab, Phleps, Przygodda (ab 1.11.), Rudnick, Sarzi (ab 1.7.), Schuller, Stolte, Weiss.

Diplomanden: Bertschik, Helfert (bis 30.4.), Krause (bis 30.4.), Jesseit (bis 31.1.), Khochfar (bis 14.4.), Wackeremann, Walcher (ab 1.8.), Wetzstein, Ziegler (ab 1.7.).

Wissenschaftliche Dienste: Bizenberger, Fabian (bis 31.5.), Grözingen, Hofferbert (ab 1.8.), Laun, Mathar, Neumann (ab 1.9.), Quetz.

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

Elektronik: Alter (ab 1.8.), Becker, Ehret, Grimm, Klein, Ridinger, Salm, Unser, Wagner, Werner (bis 30.9.), Westermann, Wrhel.

Feinwerktechnik: Böhm, Geuer (bis 30.6.), Heitz, Meister, Meixner, Morr, Pihale, Sauer.

Konstruktion: Baumeister, Ebert (ab 24.7.), Franke (freigestellt), Münch, Rohloff.

Photolabor: Anders-Özcan.

Graphik: Meißner-Dorn, Weckauf.

Bibliothek: Behme.

Verwaltung: Apfel (ab 17.4.), Flock (freigestellt nach Altersteilzeitgesetz ab 1.7.), Gieser, Kellermann, Hartmann, Heißler, Kellermann, Papousado, Schleich, Voss (ab 1.6.), Zähringer.

Sekretariat: Fé (bis 31.3.), Goldberger, Heukäufer (bis 6.12.), Janssen-Bennynck, Rushworth.

Technischer Dienst, Hausdienst: Behnke, Gatz, Götz (freigestellt), Herz, Lang, Nauss, B. Witzel, F. Witzel, Zergibel.

Auszubildende: (Feinwerktechnik): Fabianatz, Greiner, Haffner, Lares, Petri, Wesp.

Konstruktion: Jung.

Freier Mitarbeiter: Dr. Thomas Bürke.

Stipendiaten: Cretton, Del Burgo (ab 1.10.), Heraudeau (bis 30.9.), W. Herbst (bis 28.2.), Hozumi (bis 7.4.), Kamath (1.6. bis 31.10.), Kessel (DFG), Klessen (Otto-Hahn-Preis), Kroupa (bis 31.1.), Nelson, Pentericci, Popescu (Otto-Hahn-Preis), Thiering (bis 22.10.), Travaglio, Woitas (bis 30.9.), Xu (bis 15.5.).

Gäste: Balsara, USA (Oktober/November), Barrado-Navascués (Juni und November), Bodenheimer, St. Cruz/USA (Mai), Cicieliag (Juli und September/Oktober), Dye, Edingburgh/Schottland (Januar/Februar), Dodt, München, Hozumi, Kyoto/Japan (März/April), Majumdar, Bangalore/Indien (November), McIntosh, Tucson/USA (Mai und November), McKay, Michigan/USA (Juli), Mori, Tsukuba/Japan (Oktober), S. Müller, Bochum (August), Patsis, Athen/Griechenland (September), Robberto, Tucson/USA (Oktober), Shields, Ohio/USA (Juli), van der Marel, Leiden/Niederlande (Juli), Yonehara (Kyoto/Japan), Zaritski, Tucson/USA (Juli), Zabludoff, Tucson/USA (Juli).

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: Bach (15.2.–31.3.), Birkmann (28.2.–21.4.), Häring (16.8.–30.9.), Link (ab 1.9.), Lisker (1.8.–8.9.), Mayer (bis 28.2.), Wieler (29.6.–31.7.), Mohammad (1.3.–31.8.), Müller, S. (bis 28.2.), Schunck (21.8. bis 30.9.), Tschamber (10.1.–31.3.), Weinmann (1.3.–31.8.).

Calar Alto/Almeria

Lokale Leitung: Gredel, Vives.

Astronomie, Koordination: Thiele, Prada, Frahm.

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

Teleskoptechnik: Capel, de Guindos, Garcia, Helmling, Henschke, L. Hernández, Raúl López, Morante, W. Müller, Nuñez, Parejo, Hernández Arabí (ab 29.5.), Schachtebeck, Usero, Valverde, Wilhelmi.

Technischer Dienst, Hausdienst: A. Aguila, M. Aguila, Ariza, Barón, Carreño, Corral, Dominguez, Gómez, Góngora, Klee, Rosario López, Marquez, Martinez, F. Restoy, Romero, Sáez, Sanchez, Schulz (bis 31.5.), Tapia.

Verwaltung, Sekretariat: M. Hernández, M. J. Hernández, M. I. López, C. Restoy.

Arbeitsgruppen und wissenschaftliche Zusammenarbeit
Instrumentelle Arbeiten**ALFA**

Stefan Hippler, M. Kasper, M. Feldt, R. Weifl, R.-R. Rohloff, K. Wagner, P. Bizenberger sowie alle Abteilungen des MPIA und des Calar-Alto-Observatoriums, in Zusammenarbeit mit:

MPI für extraterrestrische Physik, Garching, University of Massachusetts, Amherst, USA.

CONICA

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

MIDI

Christoph Leinert, Uwe Graser, A. Böhm, B. Grimm, T. Herbst, St. Hippler, W. Laun, R. Lenzen, R. Ligorì, R. Mathar, R. Mundt, U. Neumann, E. Pitz, F. Przygodda, R.-R. Rohloff, P. Schuller, C. Storz, K. Wagner, in Zusammenarbeit mit: Univ. Amsterdam, Niederlande, Sterrewacht Leiden, Niederlande, Observatoire Meudon, Meudon, Frankreich, Observatoire de Nice, Nizza, Frankreich, Kiepenheuer-Institut Freiburg, Thüringische Landessternwarte Tautenburg.

PACS für FIRST

Dietrich Lemke, O. Krause, U. Grözinger, R. Hofferbert, U. Klaas, O. Krause, M. Stickel, H. Baumeister, A. Böhm, unter Federführung des MPI für extraterrestrische Physik,

Garching, in Zusammenarbeit mit: DLR, Berlin, Universität Kaiserslautern.

LAICA

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

OMEGA 2000

Coryn Bailer-Jones, H. Baumeister, P. Bizenberger, A. Böhm, B. Grimm, W. Laun, R.-R. Rohloff, C. Storz, Toews.

LBT mit LUCIFER und LINC

Hans-Werner Rix, P. Bizenberger, B. Grimm, W. Laun, M. Olivier, R. Rohloff, in Zusammenarbeit mit: Landessternwarte Heidelberg.

ISO-Datenzentrum

Dietrich Lemke, ISOPHOT-PI und die ISO-Gruppe des MPIA: P. Abraham, S. Bianchi, del Burgo, M. Haas, P. Heraudeau, S. Hotzel, Kiss, U. Klaas, O. Krause, M. Stickel, K. Wilke.

Wissenschaftliche Arbeiten**Planetenähnliche Objekte im freien Flug**

Reinhard Mundt, Coryn Bailer-Jones, in Zusammenarbeit mit: Instituto de Astrofísica de Canarias, Caltech, Pasadena, USA, University of Hawaii, USA, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, Ecole Normale Supérieure, Lyon, Frankreich.

Die drei Phasen der Staubheizung in ultraleuchtkräftigen Infrarotgalaxien

Ulrich Klaas, Martin Haas, H. Hippelein, K. Wilke, D. Lemke, in Zusammenarbeit mit: Ruhr-Universität Bochum, Joint Astronomy Centre, Hawaii, USA.

Schwarze Löcher in Galaxienzentren

Hans-Werner Rix, Marc Sarzi, in Zusammenarbeit mit: Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, USA, University of Arizona, Tucson, USA, Space Telescope Science Institute, Baltimore, USA, Universität Padua, Italien, University of Ohio, Athens, USA, Carnegie Institutions of Washington, USA, University of California, Berkeley, USA, Caltech, Pasadena, USA.

Rotation junger Sterne

Reinhard Mundt, Coryn Bailer-Jones, in Zusammenarbeit mit: Wesleyan University, Middletown, USA, Yale University, Caltech, Pasadena, USA.

Umlaufperioden und Massen junger Doppelsterne

Christoph Leinert, J. Woitas, R. Köhler, in Zusammen-

arbeit mit: Thüringer Landessternwarte, Tautenburg, University of California, San Diego, USA.

ISOPHOT beobachtet Sternentstehung in Dunkelwolken

Dietrich Lemke, Stefan Hotzel, L.V. Toth, O. Krause, M. Stickel, in Zusammenarbeit mit: Universität Helsinki, Finnland, Astrophysikalisches Observatorium Arcetri, Italien, ESO, Chile, ESO Science Operations Centre, Villafranca, Spanien.

Palomar 5 – ein Kugelsternhaufen in der Auflösung

Michale Odenkirchen, Eva Grebel, W. Dehnen, R. Ibata, H.-W. Rix, A. Stolte, C. Wolf, in Zusammenarbeit mit: University of Chicago, USA, Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, USA, Princeton University, USA, Johns Hopkins University, Baltimore, USA, Naval Research Lab, Washington, USA, U.S. Naval Observatory, Flagstaff, USA.

Turbulenz bei der Sternentstehung

Ralf Klessen, Andreas Burkert, in Zusammenarbeit mit: University of California, Santa Cruz, USA.

Planetenentstehung in Doppelsternen

Andrew Nelson, Wilhelm Kley, Andreas Burkert

Spiralgalaxien mit optischer Schiefelage

Gregory Rudnick, Hans-Walter Rix, in Zusammenarbeit mit: University of Arizona, Tucson, USA.

Extragalaktische Hintergrundstrahlung im fernen Infrarot

Dietrich Lemke, M. Stickel, in Zusammenarbeit mit 14 Instituten aus Europa und den USA.

ISO belegt Vereinheitlichung von Radiogalaxien und radiolauten Quasaren

Klaus Meisenheimer, Martin Haas, U. Klaas, D. Lemke, in Zusammenarbeit mit: Ruhr-Universität Bochum.

Nicht in diesem Jahresbericht behandelte Arbeiten:

Emissionsknoten im Helix-Nebel

A. Burkert, in Zusammenarbeit mit: Rice University Houston, Texas, USA, Universität Mexiko.

Oberflächenmerkmale von ultrakalten Zwergsternen

C. Bayler-Jones, R. Mundt.

Eisbanden im Spektrum von Haro 6-10

Ch. Leinert, S. Ligor, J. Woitas, in Zusammenarbeit mit: State University of Stony Brook, New York, USA, University of Wyoming, Laramie, USA.

Massenbestimmung des Sternsystems LHS 1070

Ch Leinert, J. Woitas, R. Köhler, in Zusammenarbeit mit: Astronomisches Recheninstitut Heidelberg, Wise Observatory, Tel Aviv, Israel, Universität Köln.

Das Alter der Sterne in der Sonnenumgebung

W. Dehnen, in Zusammenarbeit mit: University of Oxford, UK, Universität Padua, Italien.

Die Ausströmung von DG Tauri

R. Mundt, in Zusammenarbeit mit: Space Telescope Science Institute, Baltimore, USA, Dublin Institute of Advanced Studies, Dublin, Irland, Thüringer Landessternwarte Tautenburg, Landessternwarte Heidelberg.

Die Entstehung von Sternhaufen

R. Klessen, A. Burkert.

Ionisierende Strahlung in 3D-Simulationen

O.Kessel-Deynet, A. Burkert.

Beobachtungen der Andromeda-Galaxie mit ISOPHOT

L. Schmidtobreick, M. Haas, D. Lemke.

Galaxiendurchmusterung am nördlichen Pol der Ekliptik

M.W. Kümmel, in Zusammenarbeit mit: Landessternwarte Heidelberg.

Die Verteilung der Sternbahnen in NGC 2320

H.-W. Rix, In Zusammenarbeit mit: Sternwarte Leiden, Niederlande,

Achsensymmetrische Modelle von Galaxien

H.-W. Rix, in Zusammenarbeit mit: Sternwarte Leiden, Niederlande, University of Arizona, Tucson, USA.

Beobachtungen des Gravitationslinsen Kandidaten RX J0921+4529

H.-W. Rix, in Zusammenarbeit mit: Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, USA, University of Arizona, Tucson, USA, Space Telescope Science Institute, Baltimore, USA, University of Hawaii, USA, Astrophysikalisches Institut der Kanaren, Spanien

Halos aus Dunkler Materie um Galaxien

Andreas Burkert

Das Massenspektrum alter Kugelsternhaufen

A. Burkert, in Zusammenarbeit mit: University of California, Santa Cruz, USA.

Zusammenarbeit mit Firmen

Calar-Alto-Observatorium

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

LAICA

Filtrop AG, Balzers Liechtenstein
Präzisionsoptik Gera, Gera
Reichmann Feinoptik, Brokdorf

OMEGA 2000

Infrared Labs., Tucson USA
Rockwell, Thousand Oaks USA
Barr, Westford USA
GATIR, Archer USA
Kaufmann, Crailsheim

ALFA

AOA Inc., Cambridge,
Massachusetts, USA
Cambridge Innovations,
Framingham, Massachusetts,
USA
Coherent GmbH, Dieburg
Fast ComTec, Oberhaching
Laser Components GmbH, Olching
Microgate S.r.l., Bolzano, Italien
MIT/Lincoln Laboratory, Lexington,
Massachusetts, USA
OWIS GmbH, Staufen
Physik Instrumente, Waldbronn
Univ. Mannheim, Technische
Informatik, Lehrstuhl Integrierte
Optoelektronik, Mannheim
Xinetics Inc., Devens,
Massachusetts, USA

MIDI

AMS, Martinsried
Baumer electric, Friedberg
Börsig, Neckarsulm
Faber Industrietechnik, Mannheim
Ferrofluidics, Nürtingen
Gerwah Präzisions GmbH,
Grosswallstadt
Gutekunst, Metzingen
Hommel Werkzeuge, Viernheim
Infrared Labs, Tucson, USA
ISOLOC, Stuttgart
Melles-Griot, Bensheim
Newport, Darmstadt

OCLI, Santa Rosa, USA
Polytec, Waldbrunn
Präzisionsoptik Gera, Gera
RETEC Instruments, Idstein
Sky Blue, München
Taylor-Hobson, Wiesbaden
VSYSTEMS, München
Wiebusch, Volkmarsen

CONICA

Barr, Westford, Massachusetts, USA
Carl Zeiss, Jena
Janos, Townshend, Vermont, USA
Linos Photonics, Göttingen
Leybold, Hanau
Möller, Wedel
Omega, Vermont, USA
Pörschke, Höchst
Präzisionsoptik, Gera
Queensgate, Barkshire, GB
Richardson Grating, Rochester, USA
Vitron, Jena

PRIME

Kayser-Threde, Bremen

PACS

Agilent (früher Hewlett-Packard)
Böblingen
ANTEC, Kelkheim
API Portescap, Pforzheim
Bürklin, München
Comtronic GmbH,
Heiligkreuzsteinach
Cunz, Frankfurt
GAF, Nussloch
GSF Forschungszentrum,
Unterschleissheim
GVL Cryoengineering, Stolberg
Hopt GmbH, Schömberg
Hoschar, Karlsruhe
Kayser-Threde, München
Keithley, München
Kugler, Salem
LeCroy, Heidelberg
MagnaC, Wendlingen
Meilhaus Elektronik, PuchheimKarte
Messer-Griesheim, Ludwigshafen
MKS Instruments, München
Novotek GmbH, Böblingen
Phytron-Elektronik, Gröbenzell
Polytec GmbH, Waldbronn

Rutronik GmbH, Ispringen
Scientific Instruments Gilching
Tektronix, Köln
Vacuumschmelze, Hanau
Witte Gerätebau, Bleckede
Zeiss, Oberkochen

CCD-Technik

Dataman, Pliezhausen
EEV Ltd., GB
Häfele, Schriesheim.
Heräus, Hanau
Lockheed Martin Fairchild Syst.,
USA
Micro-Optronic-Messtechnik,
Langebrück
New Focus, Santa Clara, USA
Philips, Eindhoven, Niederlande
Roth, Karlsruhe
SITE Corp., Beaverton, Oregon, USA
Steward Observatory, Tucson,
Arizona, USA
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
ISP*D, Poing
LANTEC, Planegg
PROUT, Darmstadt
PTC, Mannheim
Rufenach, Heidelberg
Schulz, München
Scientific Computers, Aachen
Sun, Langen
Transtec, Tübingen

Werkstätten

ABB (ehem. Hartmann + Braun),
Alzenau
Almet-AMB, Mannheim

Amphenol-Tuchel Electronics, Heilbronn	Future Electronics Deutschland, Unterföhring	pbe Electronic, Elmshorn
APE Elektronik, Kuppenheim	Gould Nicolet Messtechnik, Dietzenbach	Physik Instrumente, Waldbronn
Astro- und Feinwerktechnik, Berlin	Helukabel, Hemmingen	Phytec Messtechnik, Mainz
AVIMO, Somerset, U.K.	Herz, Leister Geräte, Neuwied	Plastipol, Runkel
Best Power Technology, Erlangen	Hewlett-Packard Direkt, Böblingen	PSI Tronix, Tulare, California, USA
Binder Magnete, Villingen- Schwenningen	Holz Elektronik, Kirchheim	Püschel Elektronik, Mannheim
Börsig, Neckarsulm	Hommel-Hercules Werkzeughandel, Viernheim	R.E.D. Regional-Electronic- Distribution, Rodgau-Jügesheim
Bubenzer Bremsen, Kirchen- Wehrbach	Horst Göbel, Ludwigshafen	Radiall, Rödermark
Bürklin, München	Horst Pfau, Mannheim	Rau-Messtechnik, Kelkheim
C&K Components, Neuried b. München	HOT Electronic, Taufkirchen	Reinhold Halbeck, Offenhausen
Cadillac-Plastic, Viernheim	HTF Elektro, Mannheim	Retronic, Ronneburg
Carl Roth, Karlsruhe	Huber + Suhner, Taufkirchen	Riekert & Sprenger, Wertheim
Cherry Mikroschalter, Auerbach	IBF Mikroelektronik, Oldenburg	Rittal-Werk, Herborn
Com Pro, Stuttgart	Infrared Labs, Tucson, USA	Roland Häfele Leiterplattentechnik, Schriesheim
Compumess Elektronik, Unterschleissheim	Inkos, Reute/Breisgau	RS Components, Mörfelden- Walldorf
Comtronic GmbH, Heiligkreuzsteinach	iSystem, Dachau	Rufenach Vertriebs-GmbH, Heidelberg
Conrad Electronic, Hirschau	ITE, Sandhausen	Rutronik, Ispringen
Cryophysics, Darmstadt	Jacobi Eloxal, Altlussheim	Sasco, Putzbrunn
Dalektron, Dreieich	Jarmyn, Limburg	Scantec, Planegg
Dannewitz, Linsengericht	Kaufmann, Crailsheim	Schaffner Elektronik, Karlsruhe
Dürkes & Obermayer, Heidelberg	Kniel, Karlsruhe	Schuricht, Fellbach-Schmidlen
Dyna Systems NCH, Mörfelden- Walldorf	Knürr, München	SCT Servo Control Technology, Tausenstein
EBJ, Ladenburg	Lambda Electronics, Achern	SDRC, Neu-Isenburg
EBV-Elektronik, Leonberg	Lemo Elektronik, München	SE Spezial-Electronic, Bückeberg
EC Motion, Mönchengladbach	LPKF CAD/CAM Systeme, Garbsen	Siemens IC-Center, Mannheim
Edsyn Europa, Kreuzwertheim	Macrotron, München	Spindler & Hoyer, Göttingen
Eldon, Büttelborn	Matsuo Electronics Europe, Eschborn	Spörle Electronic, Dreieich
Elna Transformatoren, Sandhausen	Matsushita Automation, Holzkirchen	Steinbach, Bochum
elspec, Geretsried	Maxim Ges. f. elektronische inte- grierte Bausteine, Planegg	Synatron, Hallbergmoos
ELV Elektronik, Leer	Menges electronic, Dortmund	Thorlabs, Grünberg
ERNI, Adelberg	Metrofunkkabel-Union, Berlin	TMS Test- und Messsysteme, Herxheim/Hayna
eurodis Enatechnik, Quickborn	Mitsubishi-Electric, Weiterstadt	Tower Electronic Components, Schriesheim
EWF, Eppingen	MSC Vertriebs-GmbH, Stutensee	TreNew Electronic, Pforzheim
Faber, Mannheim	MTI, Baden-Baden	TS-Optoelectronic, München
Farnell Electronic Components, Deisenhofen	Nanotec, Finsing	TWK-Elektronik, Karlsruhe
Farnell Electronic Services, Möglingen	Nickel Schalt- und Messgeräte, Villingen-Schwenningen	Vacuumschmelze, Hanau
FCT Electronic, München	Niebuhr Optoelectronic, Hamburg	Vero Electronics, Bremen
Fischer Elektronik, Lüdenscheid	Nies Electronic, Frankfurt	W. & W. Schenk, Maulbronn
Franke, Aalen	Nova Elektronik, Pulheim	Wikotec, Bramsche
Fritz Faulhaber, Schönaich	Otto Faber, Mannheim	Wilhelm Gassert, Schriesheim
	OWIS GmbH, Staufen	WS CAD Elektronik, Berk Kirchen
	Parametric Technology, München	

Lehrveranstaltungen

Wintersemester 1999/2000:

- A. Burkert: Kugelsternhaufen (Vorlesung);
 J. Fried: Astronomisches Praktikum an der Universität Frankfurt/M.;
 M. Haas: Infrarotastronomie (Vorlesung);
 Ch. Leinert, D. Lemke, R. Mundt, H.-J. Röser: Einführung in die Astronomie und Astrophysik III (Seminar);

Sommersemester 2000

- M. Haas: Ferninfrarot-Astronomie (Vorlesung)
 D. Lemke, R. Mundt, H. P. Gail, Einführung in die Astronomie und Astrophysik III (Seminar)
 Chr. Leinert, u.a.: Geschichte der Astronomie (Seminar)
 A. Burkert, H.W. Rix u.a.: Stelldynamik (Seminar)
 K. Meisenheimer, H.J. Röser: Untersuchung der großräumigen Struktur des Universums (Seminar)

- Die Dozenten der Astronomie: Astronomisches Kolloquium
 E. K. Grebel: Lecturer in der X. IAGUSP Advanced School on Astrophysics über Galaxy and Stellar Evolution, Mangaratiba, Brasilien.

Wintersemester 2000/2001

- A. Burkert, H.-W. Rix: Elliptische Galaxien (Vorlesung)
 D. Lemke, R. Mundt, H.J. Röser u.a.: Einführung in die Astronomie und Astrophysik III (Seminar)
 A. Burkert, H.W. Rix u.a.: Struktur, Kinematik und Dynamik von Sternsystemen (Seminar)
 K. Meisenheimer u.a. Particle Acceleration and Radiative Processes in High-Redshift Radio Galaxies (Seminar)
 Die Dozenten der Astronomie: Astronomisches Kolloquium

Teilnahme an Tagungen, wissenschaftliche und öffentliche Vorträge

- P. Ábrahám: AG-Tagung, Bremen, September (Splintermeeting ISO: Vortrag); IAU Colloquium 181/COSPAR Colloquium 11, Canterbury, April (eingeladener Vortrag).
 C. Bailor-Jones: AG-Tagung, Bremen, September (Vortrag).
 A. Burkert: Konferenz »Star Bursts«, Ringberg, Oktober; Eingeladener Vorträge: IAU-Symposium Nr. 200: »The birth and evolution of binary stars«, Potsdam, April; Workshop »Low Mass Star Formation«, Ringberg, Juni; Workshop »Molecular Clouds and Star Formation«, Heidelberg, Juli; Workshop »Dark Matter Halos«, Santa Cruz, USA, August; Konferenz »Modes of Star Formation«, Heidelberg, Oktober; Konferenz »Evolution of the Cosmos«, Paris, France, November.
 N. Cretton: Invited Seminar »Dynamical models for elliptical galaxies: black holes and dark halos«, Genf, Februar; Vorlesungen über Galaxiendynamik an der Universität Padua, April; Konferenz »Galaxy Disks and Disk Galaxies«, Rom, Juni (eingeladener Vortrag).
 J. Fried: Vortrag »Astrologie – Wissenschaft oder Aberglaube?«, FH Zweibrücken, Dezember.
 M. Geyer: AG-Tagung, Bremen, September (Kurzvortrag, Poster); Konferenz »Galaxy Disks and Disk Galaxies«, Rom, Juni (Poster).
 U. Graser: SPIE Konferenz Nr. 4006: »Interferometry in optical astronomy«, Garching, März (Vortrag).
 E. K. Grebel: Kolloquium bei ESO, Santiago, Chile, Januar (eingeladener Vortrag); Microlensing 2000: A New Era of Microlensing Astrophysics, Cape Town, Südafrika, Februar (eingeladener Vortrag); CTIO/ESO/LCO Workshop: »Stars, Gas, and Dust in Galaxies: Exploring the Links«, La Serena, Chile, März (Vortrag); Kolloquium am STScI, Baltimore, USA, März (eingeladener Vortrag); Kolloquium in Caltech, Pasadena, USA, April (eingeladener Vortrag); Kolloquium am IGPP, LLNL, Livermore, USA, April (eingeladener Vortrag); Euroconference: »The Evolution of Galaxies, I. Observational Clues«, Granada, Mai (eingeladener Vortrag); Ringberg-Workshop: »Science with the LBT«, Rottach-Egern, Juni (Vor-

- trag); Star Formation Workshop, MPIA, Heidelberg, Juni (Vortrag); Sloan Collaboration Meeting, Johns Hopkins University, Baltimore, September (Vortrag); XIAGUSP Advanced School on Astrophysics: »Galaxy and Stellar Evolution«, Angra dos Reis, Brazil, September (Vorlesungen); AG-Tagung, Bremen, September (eingeladener Vortrag, Poster); Joint Colloquium, MPE/MPA/ESO, Garching, Oktober (eingeladener Vortrag); Internationaler Workshop »Modes of Star Formation and the Origin of Field Populations« am MPIA, Oktober (Organisation); Physikalisches Kolloquium an der Universität Hamburg, November (eingeladener Vortrag); Kolloquium am Institut für Theoretische Physik und Astrophysik der Universität Kiel, November (eingeladener Vortrag); Kolloquium an der Sternwarte der Universität Göttingen, Dezember (eingeladener Vortrag).
- R. Gredel: Workshop on »The progress of the ISOGAL project«, Lorentz Center, Leiden, April; IAU Site 2000, Marrakech, November
- M. Haas: Workshop FIRSED2000: »The Far-Infrared and Submillimeter Spectral Energy Distributions of Active and Starburst Galaxies« Groningen, April (eingeladener Vortrag); M 31 Workshop, Bad Honnef, Mai (Vortrag); FIRST Science Conference, Toledo, Dezember (Vortrag).
- D. Harbeck: AG-Tagung, Bremen, September (Vortrag, 2 Poster); Internationaler Workshop »Modes of Star Formation and the Origin of Field Populations« am MPIA, Oktober (Poster).
- S. Hippler (Poster): SPIE Konferenz Nr. 4006: »Interferometry in optical astronomy«, Garching, März
- S. Hotzel: Sternwarte Helsinki, Mai (Kolloquiumsvortrag); AG-Tagung, Bremen, September (Splintermeeting ISO: Vortrag).
- U. Klaas: Workshop FIRSED 2000: »The Far-Infrared and Submillimeter Spectral Energy Distributions of Active and Starburst Galaxies« Groningen, April O. Krause (Vortrag): SPIE: »Infrared Spaceborne Remote Sensing VIII«, San Diego, Juli (Vortrag).
- T. Kranz: Konferenz »Dark Matter in Astro and Particle Physics – Dark 2000«, Heidelberg, Juli
- M. Kümmel: Euroconference: »The Evolution of Galaxies, I. Observational Clues«, Granada, Mai (Poster); MPA/ESO/MPE Joint Astronomy Conference, Garching, August (Vortrag); ESO/ECF/STScI Workshop on »Deep Fields«, Garching, Oktober (Poster).
- B. von Kuhlmann: VC3 – Victoria Computational Cosmology Conference, Victoria, Canada, August
- S. Ligorì: IAU-Symposium Nr. 200: »The birth and evolution of binary stars«, Potsdam, April (Poster); Konferenz »Ionized Gaseous Nebulae«, Mexico City, November (Poster).
- Chr. Leinert: SPIE Konferenz Nr. 4006: »Interferometry in optical astronomy«, Garching, März (Vortrag); IAU-Symposium Nr. 200: »The birth and evolution of binary stars«, Potsdam, April (Poster); NEVEC Inauguration Ceremony, Leiden, Mai (eingeladener Vortrag); Summer School on »Space and Ground Based Optical & Infrared Interferometry«, Leiden, September (eingeladener Vortrag).
- D. Lemke: Univ. Wien, Januar (Kolloquiumsvortrag); Planetarium Wien, Januar (Öffentlicher Vortrag); Deutsche Physikalische Gesellschaft, Bremen, März (eingeladener Vortrag); Budapest, Mai (Kolloquiumsvorträge); Trebur/Rüsselsheim, Juni (Öffentlicher Vortrag); Konferenz »Infrared Thermography QIRT«, Reims, Juli (eingeladener Plenarvortrag) COSPAR Space IR, Warschau, Juli (eingeladener Vortrag); IAU Symposium 204: »The Extragalactic Infrared Background and its Cosmological Implications«, Manchester, August (eingeladener Vortrag); (Splintermeeting ISO: Organisation): AG-Tagung, Bremen, September Nordenham, Oktober (Öffentlicher Vortrag).
- R. Mundt: AG-Tagung, Bremen, September (Vortrag); Konferenz »Emission Lines from Jet Flows«, Isla de Mujeres, Mexiko, November.
- T. Naab: Konferenz »Galaxy Disks and Disk Galaxies«, Rom, Juni (2 Poster); AG-Tagung, Bremen, September (Vortrag).
- M. Odenkirchen: Workshop on »Dynamics of Star Clusters and the Milky Way«, Heidelberg, März (Vortrag); Sloan Collaboration Meeting, Johns Hopkins University, Baltimore, September (Vortrag); Internationaler Workshop »Modes of Star Formation and the Origin of Field Populations« am MPIA, Oktober (Poster).
- L. Pentericci: Dwingeloo Radio Observatory, The Netherlands, Februar (Invited colloquium); Leiden University, The Netherlands, Februar (Invited colloquium); Institute of Radioastronomy, Bologna, Italy, May (Invited colloquium); Conference on AGNs, Trieste, Mai (Vortrag); ESO/ECF/STScI Workshop on »Deep Fields«, Garching, Oktober (Poster).
- A. M. Quetz: Schülertag Physik am MPIA, Mai; Rüsselsheim, September (Öffentlicher Vortrag).
- H.-W. Rix: Astronomisches Kolloquium »CASTLES«, Bonn, Januar; Gravitational Lenses as Cosmological Tools, Tel Aviv, März (Vortrag); Sloan Digital Sky Survey, Seattle, März (Vortrag); Structural Properties of Observed Ellipticals, University of California, Santa Barbara, März (Vortrag); Talkrunde Urknall, Berlin, April; MPIA, Heidelberg, Mai (Kolloquiumsvortrag); »Black Holes in Galaxies«, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg, Mai (Kolloquiumsvortrag); »The Growth of Density Fluctuations and Structure in an Expanding Universe«, Universität Heidelberg, Mai (Kolloquiumsvortrag); Schülertag Physik am MPIA, Mai; GAFOS-Meeting, Irvine, Kalifornien, Juni; Konferenz »Galaxy Disks and Disk Galaxies«, Rom, Juni (Vortrag); Wissenschaftsshow, WDR, Köln, Oktober; Sloan Digital Sky Survey, Volkssternwarte Bonn, November (Vortrag).

- H.-J. Röser: STScI Workshop: »A Decade of HST Science«, Baltimore, April (Poster); NEON Sommer-
schule (Imaging and Photometry), Calar Alto, Juli (ein-
geladener Vortrag).
- R.-R. Rohloff: SPIE Konferenz Nr. 4006: »Interferometry
in optical astronomy«, Garching, März (Poster).
- L. Schmidtbreick: M 31 Workshop, Bad Honnef, Mai
(Vortrag).
- P. Schuller: Summer School on »Space and Ground Based
Optical & Infrared Interferometry«, Leiden, September
(Poster).
- A. Slyz: Workshop on »Numerical Methods in Astro-
physics«, Tübingen, Februar; Workshop »Disk Gala-
xies and Galaxy Disks«, Rom, Juni; Workshop on »Star
Formation«, Heidelberg, Juli; Brown Bag Cosmology
Lunch Seminar: »Numerical Hydrodynamics«, Oxford,
November; Kolloquium »Numerical Hydrodynamics
from Gas-Kinetic Theory«, Leicester, November;
Workshop on »Starbursts and the Structure and Evo-
lution of Galaxies«, Puna, Dezember (eingeladener
Vortrag).
- M. Stickel: IAU Symposium 204: »The Extragalactic
Infrared Background and its Cosmological Implica-
tions«, Manchester, August (Poster); AG-Tagung,
Bremen, September (Splintermeeting ISO: Vortrag);
ESO/ECF/STScI Workshop on »Deep Fields«,
Garching, Oktober (Poster); FIRST Science Conferen-
ce, Toledo, Dezember (Vortrag).
- C. Travaglio: Euroconference: »The Evolution of
Galaxies, I. Observational Clues«, Granada, Mai (Pos-
ter); Workshop in Honour of Prof. G. J. Wasserburg,
Turin, Juni (eingeladener Vortrag); Conference on
»Nuclei in the Cosmos VI«, Aarhus, Denmark, Juli
(Vortrag und 3 Poster).
- M. Yan: IVth Tetons Summer Conference: »Galactic
Structure, Stars, and the Interstellar Medium«, Jackson
Hole, Mai (Poster).

Mitarbeit in Gremien

- A. Burkert: Vorsitzender der Mitarbeitervertreter in der
Sektion der MPG; Senator der MPG.
- J. Fried: Thesis Opponent bei der Promotion von T.
Pursimo, Univ. of Turku, Finland.
- E. K. Grebel: Frauenbeauftragte; Gutachterin für Anträge
an den National Fund for Science and Technology
(FONDECYT), Chile; Gutachterin für Anträge auf
internationale Zeit für die La Palma und Teide Obser-
vatorien, Spanien; Gutachterin für Anträge für die
Netherlands Research School for Astronomy (NOVA),
Niederlande; Mitglied des Core Science Team for a
NIRMOS Microshutter Array for the Next Generation
Space Telescope; Mitglied des PhD Advisory Council
(PAC) am MPIA; Mitglied des Studentenauswahl-
komitees am MPIA; Vertreterin des MPIA im
Collaboration Council des Sloan Digital Sky Survey.
- R. Gredel: Mitglied der OPTICON-Arbeitsgruppe 'Future
of medium-sized telescopes'; Mitglied des Gutachter-
ausschusses zur Evaluierung des Nationalen Observat-
oriums in Athen; Mitglied des Programmausschusses
für den Calar Alto.
- U. Klass: Mitglied des ISO Post Operations Coordination
Committee.
- Ch. Leinert: Mitglied der Arbeitsgruppe der ESO zur
Vorbereitung der »Science Demonstration Time« für
das VLTI; Mitglied der Berufungskommission der
Universität Jena für die C3-Professur Astrophysik.
- D. Lemke: Mitglied Gutachterausschuss Verbundfors-
chung Astrophysik des BMBF; Mitglied ISO Science
Team der ESA.
- R. Mundt: Mitglied Calar Alto Programmkomitee.
- H.-W. Rix: ESA Astronomy Working Group Meetings im
Januar, Februar, Mai und September; ESO Visiting
Committee, Paranal/Chile, Oktober.
- H.-J. Röser: Mitglied Calar Alto Programmkomitee; Peer
Review for Cycle 10 Hubble Space Telescope Pro-
posals.

Veröffentlichungen

- Ábrahám, P., L.G. Balázs and M. Kun: Morphology and Kinematics of the Cepheus Bubble. *Astronomy & Astrophysics* 354, 645-656 (2000).
- Ábraham, P. and C. Leinert: ISO Observations of Binary T Tau Stars. In: *Birth and Evolution of Binary Stars*. (Eds) B. Reipurth, H. Zinnecker. IAU Poster Proceedings 200, Astrophysikalisches Institut Potsdam, Potsdam 2000, Proceedings of a Conference held at Astrophysikalisches Institut Potsdam, 10 - 15 April 2000, 34-35.
- Ábrahám, P., C. Leinert, A. Burkert, T. Henning and D. Lemke: Far-infrared photometry and mapping of Herbig Ae/Be stars with ISO. *Astronomy & Astrophysics* 354, 965-982 (2000).
- Acosta-Pulido, J.A., C. Gabriel and H.O. Castañeda: Transient Effects in ISOPHOT Data: Status of Modelling and Correction Procedures. *Experimental Astronomy* 10, 333-346 (2000).
- Alton, P.B., E.M. Xilouris, S. Bianchi, J. Davies and N. Kylafis: Dust properties of external galaxies: NGC 891 revisited. *Astronomy & Astrophysics* 356, 795 (2000).
- Andersen, R. and A. Burkert: The Self-regulated Evolution of Dwarf Galaxies. *The Astrophysical Journal* 531, 296-311 (2000).
- Bacciotti, F., R. Mundt, T.P. Ray, J. Eisloffel, J. Solf and M. Camenzind: HST/STIS Spectroscopy of the Optical Outflow from DG Tau: Structure and Kinematics on Sub-arcsecond Scales. *The Astrophysical Journal* 537, L49-L53 (2000).
- Bailer-Jones, C.A.L.: Stellar Parameters from very Low Resolution Spectra and Medium Band Filters. *Teff_log g* and $[M/H]$ using neutral networks. *Astronomy & Astrophysics* 357, 197-205 (2000).
- Bailer-Jones, C.A.L., P. Bizenberger and C. Storz: Achieving a wide field near infrared camera for the Calar Alto 3.5m telescope. In: *Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*. (Eds) M. Iye, A.F.M. Moorwood. SPIE Proceedings 4008, SPIE, 2000, Proceedings of a Conference held at Munich, March 2000, 1305.
- Bailer-Jones, C.A.L. and R. Mundt: A search for variability at and below the hydrogen burning limit. In: *Stellar Clusters and Associations: Convection, Rotation, and Dynamos*. (Eds) R. Pallavicini, G. Micela, S. Sciortino. ASP Conference Series 198, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Sicily, May 1999, 341.
- Barrado y Navascués, D., C.P. Deliyannis and J.R. Stauffer: WIYN Open Cluster Study : Lithium in Cold Dwarfs of the M35 Open Cluster. In: *Stellar Clusters and Associations: Convection, Rotation, and Dynamos*. (Eds) R. Pallavicini, G. Micela, S. Sciortino. ASP Conference Proceedings 198, American Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Sicily, May, 1999, 265-268.
- Barrado y Navascués, D., J.R. Stauffer and B.M. Patten: A Lithium Age for the Young Cluster IC 2391. In: *Stellar Clusters and Associations: Convection, Rotation, and Dynamos*. (Eds) R. Pallavicini, G. Micela, S. Sciortino. ASP Conference Series 198, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Mondello, Palermo, Italy, 25 - 28 May 1999, 269-272.
- Bendo, G.J., R.D. Joseph, M. Wells, P. Gallais, M. Haas, A.M. Heras, U. Klaas, R.J. Laureijs, K. Leech, L. Metcalfe, M. Rowan-Robinson, B. Schulz and C. Telesco: Star Formation in a magnitude-limited sample of spiral galaxies. In: *ISO beyond point sources: studies of extended infrared emission*. (Eds) R.J. Laureijs, K. Leech, M. Kessler. Conference Series 445, ESA, Noordwijk 2000, Proceedings of a Conference held at Vilspa, September 1999, 143.
- Bianchi, S., P.B. Alton and J.I. Davies: ISO observations of spiral galaxies: modelling the FIR emission. In: *ISO beyond point sources: studies of extended infrared emission*. (Eds) R.J. Laureijs, K. Leech, M. Kessler. Conference Series 445, ESA, Noordwijk 2000, Proceedings of a Conference held at Vilspa, September 1999, 149.
- Bianchi, S., J.I. Davies and P.B. Alton: Monte Carlo predictions of Far-Infrared emission from spiral galaxies. *Astronomy & Astrophysics* 359, 65-81 (2000).
- Bianchi, S., J.I. Davies, P.B. Alton, M. Gerin and F. Casoli: SCUBA observations of NGC 6946. *Astronomy & Astrophysics* 353, L13-L17 (2000).
- Bianchi, S., A. Ferrara, L.J. Davies and P.B. Alton: Effects of Clumping on the Observed Properties of Dusty Galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 311, 601-610 (2000).
- Binney, J.J., W. Dehnen and G. Bertelli: The age of the solar neighbourhood. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 318, 658 - 664 (2000).
- Bodenheimer, P., A. Burkert, R. Klein and A. Boss: Multiple Fragmentation of Protostars. In: *Protostars and Planets IV*. (Eds) V. Mannings, A.P. Boss, S.S. Russell. University of Arizona Press, Tucson 2000, Proceedings of a Conference held at Santa Barbara, July 1998, 675-702.
- Brandner, W., M.F. Corcoran, B. Brandl, Y.-H. Chu, E.K. Grebel, B. Johnson, B. Koribalski, S. Marchenko, A. Muecke, R. Mushotzky, A. Moffat, J. Pittard, A. Pollock, A. Ptak, G. Skalkowski and I. Stevens: Physical Properties of visual counterparts to X-ray sources in the giant HII region NGC 3603. *American Astronomical Society, HEAD meeting* 32, 4207 (2000).
- Brandner, W., E.K. Grebel, R. Barba and N.R. Walborn: Star Formation in 30 Doradus: The Next Generation. *American Astronomical Society Meeting* 196, 2808 (2000).
- Brandner, W., E.K. Grebel, Y.-H. Chu, H. Dottori, B. Brandl, Richling, H.W. Yorke, S. Points and H. Zinnecker: HST/WFPC2 and VLT/ISAAC Observations of Proplyds in the Giant HII Region NGC 3603. *The Astrophysical Journal* 119, 292-301 (2000).
- Brandner, W., A. Stolte, E.K. Grebel, B. Brandl, F. Iwamuro, T. Maihara, K. Motohara, P. Baudoz, Graves, O. Guyon, M. Northcott and D. Potter: A NIR high-resolution study of Galactic Starburst Clusters. *American Astronomical Society Meeting* 197, 5205 (2000).
- Burkert, A.: Early stages of globular clusters. In: *The Galactic Halo : From Globular Cluster to Field Stars*. (Eds) A. Noels, P. Magain, D. Caro et al. Institut d'Astrophysique et de Geophysique, Liège 2000, Proceedings of a Conference held at Liège, 5-8 July 1999, 539.
- Burkert, A.: The Structure and Evolution of Weakly Self-interacting Cold Dark Matter Halos. *The Astrophysical Journal* 534, L143-L146 (2000).
- Burkert, A. and P. Bodenheimer: Turbulent Molecular Cloud Cores: Rotational Properties. *The Astrophysical Journal* 543, 822-830 (2000).

- Burkert, A. and D. Lin: Thermal Instability and the Formation of Clumpy Gas Clouds. *The Astrophysical Journal* 537, 270-282 (2000).
- Burkert, A. and T. Naab: On the Formation of Boxy and Disky Elliptical Galaxies. In: *Dynamics of Galaxies: from the Early Universe*. (Eds) F. Combes, G.A. Mamon, V. Charmandaris. ASP Conference Series 197, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Paris, France, 9-13 July, 1999, 217-221.
- Burkert, A. and G. Smith: A Proposed Functional Form for the Upper Mass Spectrum of Old Globular Cluster Systems. *The Astrophysical Journal* 542, L95-L98 (2000).
- Butler, D.J., R.I. Davies, I. Richard, H. Fews, R. Redfern, R. Michael, N. Ageorges, W. Hackenberg, R.-R. Rohloff, T. Ott and S. Hippler: Sodium layer monitoring at Calar Alto by LIDAR. In: *Adaptive Optics Systems Technology*. (Ed.) P.L. Wizinowich. SPIE Proceedings 4007, 2000, Proceedings of a Conference held at Munich, 29-31 March 2000, 358-367.
- Castañeda, H.O. and U. Klaas: Recognition of space weather impact on the ISOPHOT detectors. *Experimental Astronomy* 10, 369-380 (2000).
- Chini, R., M. Haas, U. Klaas, E. Kreysa, D. Lemke, K. Meisenheimer, S.A.H. Müller and M. Stickel: The ISOPHOT View of Quasars and Radiogalaxies. In: *ISO Surveys of a Dusty Universe*. (Eds) D. Lemke, M. Stickel, K. Wilke. *Lecture Notes in Physics* 548, Springer, Heidelberg 2000, Proceedings of a Conference held at Ringberg Castle, November 1999, 169-176.
- Clemens, D.P., J. Bookbinder, A. Goodman, H. Kristen, P. Myers, P. Padoan, K. Wood, M.H. Heyer, C. Heiles, T.J. Jones, J. Dickey, E. Young, G. Rieke, K. Dow, C.D. Dowell, B. Draine, J. Greaves, U. Klaas, R.J. Laureijs, A. Lazarian, B. Schulz and E. Zweibel: The Milky Way Magnetic Field Mapping Mission: M4. *American Astronomical Society Meeting* 32, 5208 (2000).
- Cretton, N., H.-W. Rix and P.T. de Zeeuw: The Distribution of Stellar Orbits in the Giant Elliptical Galaxy NGC 2320. *The Astrophysical Journal* 536, 319-330 (2000).
- Davies, R., A. Eckart, W. Hackenberg, T. Ott, A. Wirth, M. Kasper and A. Quirrenbach: The ALFA Laser Guide Star: Operation and Results. *Experimental Astronomy* 10, 103 (2000).
- Davies, R.I., M.E. Kasper, N.A. Thatte, M. Tecza, L.E. Tacconi-Garman, S.W. Anders and T. Herbst: ALFA and 3D: integral field spectroscopy with adaptive optics. In: *Adaptive Optical Systems Technology*. (Ed.) P.L. Wizinowich. 4007, SPIE, Bellingham, WA. 2000, Proceedings of a Conference held at Munich, March 27 - 29, 2000, 952-961.
- Dehnen, W.: The Distribution of Nearby Stars in Velocity Space. In: *Galaxy Dynamics*. (Eds) D.R. Merritt, M. Valluri, J.A. Sellwood. ASP Conference Series 182, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Rutgers University, New Jersey, U.S.A., August 1998, 297.
- Dehnen, W.: The Effect of the Outer Lindblad Resonance of the Galactic Bar on the Local Stellar Velocity Distribution. *The Astronomical Journal* 119, 800-812 (2000).
- Dehnen, W.: A Very Fast and Momentum-Conserving Tree Code. *The Astrophysical Journal* 536, 39-42 (2000).
- Dennefeld, M., R. Gredel, A. Pizzella, P. Leisy, A. Budovicova, M. Markoulaki and I. Pascucci: Supernova 2000cw in MCG +5-56-007. *IAU Conference Proceedings* 7457, 4 (2000).
- Dieball and E.K. Grebel: Studies of Binary Star Cluster Candidates in the Bar of the LMC. II. *Astronomy & Astrophysics* 358, 897-909 (2000).
- Dieball, E.K. Grebel and C. Theis: Studies of Binary Star Cluster Candidates in the Bar of the LMC. I. *SL* 353 & *SL* 349. *Astronomy & Astrophysics* 358, 144-153 (2000).
- Docobo, J.A., C. Alvarez, J.F. Lahulla, V. Lancharesi and A. Aguirre: CCD measurements of visual double stars from the German-Spanish Astronomical Center at Calar Alto. *Astronomische Nachrichten* 321, 53 (2000).
- Dole, H., R. Gispert, G. Lagache, J.-L. Puget, H. Aussel, F.R. Bouchet, P. Ciliegi, D.L. Clements, C. Cesarsky, F.-X. Désert, D. Elbaz, A. Franceschini, B. Guiderdoni, M. Harwit, R.J. Laureijs, D. Lemke, R.G. McMahon, A.F.M. Moorwood, S. Oliver, W.T. Reach, M. Rowan-Robinson and M. Stickel: FIRB-ACK Source Counts and Cosmological Implications. In: *ISO Surveys of a Dusty Universe*. (Eds) D. Lemke, M. Stickel, K. Wilke. *Lecture Notes in Physics* 548, Springer, Heidelberg 2000, Proceedings of a Conference held at Ringberg Castle, November 1999, 54-61.
- Eckart, A., S. Hippler, A. Glindemann, W. Hackenberg, A. Quirrenbach, P. Kalas, M. Kasper, R.I. Davies, T. Ott, S. Rabien, D. Butler, H.C. Holstenberg, D. Looze, R.-R. Rohloff, S.J. Wagner, N. Wilnhammer, D. Hamilton, S.V.W. Beckwith, I. Appenzeller and G. Genzel: ALFA: The MPIA/MPE Laser Guide Star AO System. *Experimental Astronomy* 10, 1-3 (2000).
- Efstathiou, A., S. Oliver, M. Rowan-Robinson, C. Surace, T. Sumner, P. Héraudeau, M.J.D. Linden-Vørnle, D. Rigopoulou, S. Serjeant, R.G. Mann, C.J. Cesarsky, L. Danese, A. Franceschini, R. Genzel, A. Lawrence, D. Lemke, R.G. McMahon, G. Miley, J.-L. Puget and B. Rocca-Volmerange: The European Large Area ISO survey III: 90 μ m extragalactic source counts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 319, 1169-1177 (2000).
- Eisloffel, J., R. Mundt, T.P. Ray and L.F. Rodriguez: Collimation and Propagation of Stellar Jets. In: *Protostars and Planets IV*. (Eds) V. Mannings, A.P. Boss, S. Russel. University of Arizona Press, Tucson 2000, Proceedings of a Conference held at Santa Barbara, July, 1998, 815-840.
- Elsässer, H.: Gefahren aus dem Weltall? *Naturwissenschaftliche Rundschau* 53, 61-68 (2000).
- Evans, N., M. Wilkinson, P. Guhathakurta, E.K. Grebel and S.S. Vogt: Dynamical Mass Estimates for the Halo of M31 from Keck Spectroscopy. *The Astrophysical Journal* 540, L9-L12 (2000).
- Feldt, M., T. Henning and B. Stecklum: Massereiche Sterne - Entstehung und Frühphasen. *Sterne und Weltraum* 39, 950-955 (2000).
- Feldt, M., M.E. Kasper, F. Eisenhauer and S. Hippler: The Impact of Adaptive Optics on Star Formation research. In: *SPIE Proceedings* 4007. (Ed.) P.L. Wizinowich. Proceedings of a Conference held at Munich, 29-31 March 2000, 847-856 (2000).
- Franx, M., A. Moorwood, H. Rix, K. Kuijken, H. Rottgering, P. van der Werf, P. van Dokkum, I. Labbe and G. Rudnick: FIRES at the VLT: the Faint InfraRed Extragalactic Survey. *The Messenger* 99, 20-22 (2000).
- Fried, J.W., B. von Kuhlmann, K. Meisenheimer, H.-W. Rix, C. Wolf, H.H. Hippelein, M. Kümmel, S. Phleps, H.-J. Röser, I. Thierring and C. Maier: The Luminosity Function Of Field Galaxies And Its Evolution Since $z=1$. *Astronomy & Astrophysics* 367, 788-800 (2000).
- Gabriel, C. and J.A. Acosta-Pulido: Deglitching Methods by the ISOPHOT Interactive Analysis. *Experimental Astronomy* 10, 319-331 (2000).
- Gallagher, J., E.K. Grebel, P. Kroupa, D. McLaughlin, H. Zinnecker and S.F. Portegies Zwart: A few General Remarks from the Final Discussion of the Workshop on Massive Stellar Clusters. In: *Massive Stellar Clusters*. (Eds) A. Lancon, C. Boily. ASP Conference Series 211, Astronomical Society of the Pacific,

- Provo 2000, Proceedings of a Conference held at Strasbourg, November 1999, 310-318.
- Gallino, R., M. Busso, M. Lugaro, C. Travaglio and O. Straniero: s-process Nucleosynthesis in Intermediate Mass AGB Stars and its Metallicity Dependence. In: *The Galactic Halo: From Globular Clusters to Field Stars*. (Eds) A. Noels, P. Magain, D. Caro et al. Liège International Astrophysical Colloquium 35, D. Caro, Liège 2000, Proceedings of a Conference held at Liège, July 5-8, 1999, 81.
- Geffert, M. and M. Odenkirchen: Kinematics of globular clusters based on Hipparcos calibrated proper motions. In: *The Galactic Halo : From Globular Cluster to Field Stars*. (Eds) A. Noels, P. Magain, D. Caro et al. Institut d'Astrophysique et de Géophysique, Liège 2000, Proceedings of a Conference held at Liège, July 5-8, 1999, 303.
- Geyer, M.P. and F. Schmitz: Radial stellar oscillations under the influence of the dynamics of the atmosphere - a one-dimensional approach. *Astronomy & Astrophysics* 361, 340-348 (2000).
- Glindemann, A., S. Hippler and W. Hackenberg: Adaptive Optics on Large Telescopes. *Experimental Astronomy* 10, 5-47 (2000).
- Gould, A. and H.-W. Rix: Binary Black Hole Mergers from Planet-like Migrations. *The Astrophysical Journal* 532, 29-32 (2000).
- Grebel, E.K.: Star Clusters in Local Group Galaxies - Impact of Environment on Their Evolution and Survival. In: *Massive Stellar Clusters*. (Eds) A. Lancon, C. Boily. ASP Conference Series 211, Astronomical Society of the Pacific, Provo 2000, Proceedings of a Conference held at Strasbourg, November 1999, 262-266.
- Grebel, E.K.: Star Formation Histories and Properties of Dwarf Galaxies in the Local Volume. *American Astronomical Society Meeting* 196, 2001 (2000).
- Grebel, E.K.: The Star Formation History of the Local Group. In: *Star Formation from the Small to the Large Scale*, 33rd ESLAB Symposium. (Eds) F. Favata, A. Kaas, A. Wilson. ESA Conference Proceedings 445, ESA, Noordwijk 2000, Proceedings of a Conference held at Noordwijk, November 1999, 87-98.
- Grebel, E.K., R. Braun and W.B. Burton: Are Compact High-Velocity Clouds The Missing Local Group Satellites? *American Astronomical Society Meeting* 196, 2809 (2000).
- Grebel, E.K. and Y.-H. Chu: Hubble Space Telescope Photometry of Hodge 301: An "Old" Cluster in 30 Doradus. *The Astrophysical Journal* 119, 787-799 (2000).
- Grosbol, P., D. Block and P. Patsis: Location of Dust Lanes in Spiral Galaxies. In: *Location of Dust Lanes in Spiral Galaxies*. (Eds) F. Combes, A. Mammon, V. Charmandaris. ASP Conference Series 197, The Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Paris, 15th IAP Meeting, 1999, 191.
- Guhathakurta, P., D.B. Reitzel and E.K. Grebel: Keck studies of M31's stellar halo. In: *Discoveries and Research Prospects from 8-10-Meter-Class Telescopes*. (Ed.) C. Bergeron. SPIE Conference Proceedings 4005, SPIE, Garching 2000, Proceedings of a Conference held at Garching, Germany, 1999, 168-179.
- Gutiérrez, C.M., F. Prada and M. Azzaro: The Morphology of Satellites in External Galaxies. In: *XVth Meeting Dynamics of Galaxies: From the Early Universe to the Present*. (Eds) F. Combes, G.A. Mamon, V. Charmandaris. ASP Conference Series 197, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Paris, France, July 9-13, 1999, 345-346.
- Haas, M.: Cold dust in M31 as mapped by ISO. In: *The Interstellar Medium in M31 and M33*. (Eds) E.M. Berkhuijsen, R. Beck. Proceedings of the WE-Heraeus Seminar 232, Shaker Verlag, Aachen 2000, Proceedings of a Conference held at Bad Honnef, Germany, Mai 2000, 69.
- Haas, M., U. Klaas, I. Coulson, E. Thommes and C. Xu: The cold dust concentrations in the colliding galaxies NGC 4038/39. *Astronomy & Astrophysics* 356, L83-L87 (2000).
- Haas, M., S.A.H. Müller, R. Chini, K. Meisenheimer, U. Klaas, D. Lemke, E. Kreysa and M. Camenzind: Dust in PG-Quasars as Seen by ISO. *Astronomy & Astrophysics* 354, 453-466 (2000).
- Hackenberg, W., A. Eckart, J. Davies, S. Rabien, T. Ott, M. Kasper, S. Hippler and A. Quirrenbach: Near-Infrared Adaptive Optics Observations of Galaxy Cluster: Abell 262 at $z=0.0157$, J1836.3CR at $z=0.414$, and PKS0743-006 at $z=0.994$. *Astronomy & Astrophysics* 363, 41-61 (2000).
- Häfner, R., N.W. Evans, W. Dehnen and J.J. Binney: A dynamical model of the inner Galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 314, 433 - 452 (2000).
- Häfner, R., W. Evans, W. Dehnen and J. Binney: Dynamical Models of the Inner Milky Way. In: *Galaxy Dynamics*. (Eds) D.R. Merritt, M. Vallari, A. Sellwood. ASP Conference Series 327, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Rutgers, N.J., August 8-12, 1998, 433-453.
- Heitsch, F., E.G. Zweibel, P.S. Li, M.-M. Mac Low and M.L. Norman: From Simulations to Observations: Polarization Maps of Star-Forming Regions. *American Astronomical Society Meeting* 197, 513 (2000).
- Henning, T., R. Launhard and A. Burkert: Massive Young Stellar Objects with Molecular Outflows. *Astronomy & Astrophysics* 353, 211-226 (2000).
- Herbst, T.M.: First Results with a Wide-Field Near-Infrared Integral Field Unit. In: *Imaging the Universe in Three Dimensions*. (Eds) W.v. Breugel, J. Bland-Hawthorn. ASP Conference Series 195, American Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Walnut Creek, California, March 29 - April 1, 1999, 333.
- Herbst, T.M., H.-W. Rix, P. Bizenberger and M. Ollivier: LINC: A Near Infrared Beam Combiner for the Large Binocular Telescope. In: *Interferometry in Optical Astronomy*. (Eds) P.J. Lena, A. Quirrenbach. 4006, SPIE, Bellingham, WA. 2000, Proceedings of a Conference held at Munich, March 27-29, 2000, 43-53.
- Hipplein, H., M. Haas, D. Lemke, M. Stickel, R. Tuffs, U. Klaas and H. Völk: Cold dust in M33. In: *Interstellar Medium in M31 and M33*. (Eds) E. Berkhuijsen, R. Beck, R. Waltherbos. 232, Shaker-Verlag, Aachen 2000, Proceedings of a Conference held at Bad Honnef, Mai 2000, 81-84.
- Hippler, S., W. Jaffe, R.J. Mathar, C. Storz, K. Wagner, W.D. Cotton, G. Perrin and M. Feldt: MIDI: controlling a two 8-m telescope Michelson interferometer. In: *Interferometry in Optical Astronomy*. (Eds) P. Lena, A. Quirrenbach. SPIE Proceedings 4006, SPIE, Bellingham, WA, USA 2000, Proceedings of a Conference held at München, 27 March - 1 April, 2000, 92-98.
- Hippler, S., M. Kasper, M. Feldt, R. Weiss, D.P. Looze and L. Montoya: ALFA: three years of experience in adaptive optics with a laser guide star. In: *Adaptive Optics Systems Technology*. (Ed.) P.L. Wizinowich. SPIE Proceedings 4007, SPIE, Bellingham, Washington, USA 2000, Proceedings of a Conference held at Munich, 29-31 March 2000, 41-49.
- Ho, L.C., G. Rudnick, H.-W. Rix, J.C. Shields, D.H. McIntosh, A.V. Filippenko, W.L.W. Sargent and M. Eracleous: Double-Peaked Broad Emission Lines in NGC 4450 and Other Liners. *The Astrophysical Journal* 541, 120-125 (2000).
- Hodge, P.W., D.B. Zucker and E.K. Grebel: An Emission Line Survey of Nearby Dwarf Galaxy Candidates. *American Astronomical Society Meeting* 197, 3812 (2000).

- Hopwood, M.E.L., A. Evans, T.P. Roberts, M.R. Burleigh, M. Odenkirchen, A.P. Beardmore, T. O'Brien, R.D. Jeffries, A. Penny and S.P.S. Eyres: A possible detection of diffuse extended X-ray emission in the environment of the globular cluster NGC 6779. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 316, L5-L8 (2000).
- Hotzel, S., D. Lemke, O. Krause, M. Stickel and L.V. Tóth: Chamaeleon's Cold Cloud Cores. In: *ISO Surveys of a Dusty Universe*. (Eds) D. Lemke, M. Stickel, K. Wilke. *Lecture Notes in Physics* 548, Springer, Heidelberg 2000, Proceedings of a Conference held at Ringberg Castle, November 1999, 259-266.
- Hozumi, S., A. Burkert and T. Fujiwara: The Origin and Formation of Cuspy Density Profiles through Violent Relaxation of Stellar Systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 311, 377-384 (2000).
- Hujeirat, A., P. Myers, M. Camenzind and A. Burkert: Collapse of weakly ionized rotating turbulent Cloud Cores. *New Astronomy* 4, 601-613 (2000).
- Ibata, R., M. Irwin, O. Bienaymé, R.-D. Scholz and J. Guibert: Discovery of High Proper-Motion Ancient White Dwarfs: Nearby Massive Compact Halo Objects. *The Astrophysical Journal* 532, L41-L45 (2000).
- Ibata, R., M. Irwin, G. Lewis and A. Stolte: Galactic halo substructure in the Sloan Digital Sky Survey: the ancient tidal stream from the Sagittarius dwarf galaxy. *The Astrophysical Journal* 547, L133-L136 (2000).
- Ida, S., J. Larwood and A. Burkert: Evidence for Early Stellar Encounters in the Orbital Distribution of Edgeworth-Kuiper Belt Objects. *The Astrophysical Journal* 528, 351-356 (2000).
- Jaffe, W., S. Hippler and G. Perrin: FITS Data Formats for Optical / IR Interferometry. In: *Working on the Fringe: Optical and IR Interferometry from Ground and Space*. (Eds) S. Unwin, R. Stachnik. *ASP Conference Series* 194, *Astronomical Society of the Pacific*, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Dana Point, California, USA, 24 - 27 May 1999, 101-104.
- Jeffries, R.D., E. Totten, D. Barrado y Navascues and N.C. Hambly: The Lithium Depletion Boundary and Age of NGC 2547. In: *Stellar Clusters and Associations: Convection, Rotation and Dynamos*. (Eds) R. Pallavacini, G. Micela, S. Sciortino. *ASP Conference Series* 198, *Astronomical Society of the Pacific*, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Mondello, Palermo, Italy, 25 - 28 May 1999, 281-284.
- Juvela, M., K. Mattila and D. Lemke: Cirrus spectra of low surface brightness regions. In: *ISO beyond point sources: studies of extended infrared emission*. (Eds) R.J. Laureijs, K. Leech, M. Kessler. *ESA Conference Series* 455, ESA, Noordwijk 2000, Proceedings of a Conference held at Vilspa, September 1999, 99.
- Juvela, M., K. Mattila and D. Lemke: Cosmic Infrared Background: ISOPHOT FIR Source counts at 90, 150 and 180 μm . In: *ISO Surveys of a Dusty Universe*. (Eds) D. Lemke, M. Stickel, K. Wilke. *Lecture Notes in Physics* 548, Springer, Heidelberg 2000, Proceedings of a Conference held at Ringberg Castle, November 1999, 88-95.
- Juvela, M., K. Mattila and D. Lemke: Far Infrared Extragalactic Background Radiation: I. Source Counts with ISOPHOT. *Astronomy & Astrophysics* 360, 813-822 (2000).
- Kahanpää, J., M. Radovich, D. Lemke and K. Mattila: Modeling the far-infrared emission of NCG 253. In: *The Interstellar Medium in M31 and M33*. (Eds) E.M. Berkhuijsen, R. Beck. *Proceedings of the WE-Heraeus Seminar* 232, Shaker Verlag, Aachen 2000, Proceedings of a Conference held at Bad Honnef, Germany, Mai 2000, 89.
- Kambas, A., J.I. Davies, R.M. Smith, S. Bianchi and J. Haynes: The low surface brightness extent of the Fornax Cluster. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 120, 1316-1324 (2000).
- Karachentsev, I., V. Karachentseva, A.A. Suchkov and E.K. Grebel: Dwarf Galaxy Candidates Found on the SERC EJ Sky Survey. *Astronomy & Astrophysics* 145, 415-423 (2000).
- Karachentsev, I.D., V.E. Karachentseva, A.E. Dolphin, D. Geisler, E.K. Grebel, P. Guhathakurta, P.W. Hodge, A. Sarajedini, P. Seitzer and M.E. Sharina: Dwarf spheroidal galaxies in the M81 group. *Astronomy & Astrophysics* 363, 117-129 (2000).
- Karachentsev, I.D., M.E. Sharina, E.K. Grebel, A. Dolphin, D. Geisler, P. Guhathakurta, P. Hodge, V. Karachentseva, Sarajedini and P. Seitzer: WFC2 Imaging of the Dwarf Spheroidal Galaxy ESO 410-G005. *The Astrophysical Journal* 542, 128-136 (2000).
- Kasper, M., D. Looze, S. Hippler, M. Feldt, R. Weiss, R.I. Davies and I. Richard: Practical approach to modal basis selection and wavefront estimation. In: *Adaptive Optics Systems Technology*. (Ed.) P.L. Wizinowich. *SPIE Proceedings* 4007, SPIE, Bellingham, Washington, USA 2000, Proceedings of a Conference held at Munich, 29-31 March 2000, 592-599.
- Kasper, M., D. Looze, S. Hippler, T. Herbst, A. Glindemann and T. Ott: ALFA: Adaptive Optics for the Calar Alto Observatory ; Optics, Control System, and Performance. *Experimental Astronomy* 10, 49-73 (2000).
- Keeton, C.R., E.E. Falco, C.D. Impey, C.S. Kochanek, J. Lehár, B.A. McLeod, H.-W. Rix, J.A. Muñoz and C.Y. Peng: The Host Galaxy of the Lensed Quasar Q0957+561. *The Astrophysical Journal* 542, 74-93 (2000).
- Kessel-Deynet, O. and A. Burkert: Ionizing Radiation in Smoothed Particle Hydrodynamics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 315, 713-721 (2000).
- Kessel-Deynet, O. and A. Burkert: Star Formation 2000. *Max-Planck-Institut für Astronomie / Astrophysikalisches Institut Jena, Heidelberg* 2000, 1-73 p.
- Kiss, C., L.V. Tóth, A. Moór, F. Sato, S. Nikoli and J.G.A. Wouterloot: Low Mass Clouds in the Cephus-Cassiopeia void I. Khavtassi 15. *Astronomy & Astrophysics* 363, 755-766 (2000).
- Klessen, R.: One-Point Probability Distribution Functions of Supersonic Turbulent Flows in Self-Gravitating Media. *The Astrophysical Journal* 535, 869-886 (2000).
- Klessen, R. and A. Burkert: The Formation of Stellar Clusters: Gaussian Cloud Conditions I. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 128, 287-139 (2000).
- Klessen, R., F. Heitsch and M. M.-M.: Gravitational Collapse in Turbulent Molecular Clouds. I. Gasdynamical Turbulence. *The Astrophysical Journal* 353, 887-906 (2000).
- Kley, W.: Evolution of an Embedded Planet in a Binary System. In: *Birth and Evolution of Binary Stars*. (Eds) B. Reipurth, H. Zinnecker. *IAU Poster Proceedings* 200, *Astrophysikalisches Institut Potsdam*, Potsdam 2000, Proceedings of a Conference held at Astrophysikalisches Institut Potsdam, 10 - 15 April 2000, 211-213.
- Kley, W.: On the Migration of a System of Protoplanets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 313, L47-L51 (2000).
- Kley, W.: The Orbital Evolution of Planets in Disks. In: *Disks, Planetesimals, and Planets*. (Eds) F. Garzón, C. Eiroa, D. de Winter et al. *ASP Conference Proceedings* 219, *The Astronomical Society of the Pacific*, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain, 24- 28 January 2000, 64-69.
- Kley, W. and A. Burkert: Disks and Planets in Binary Systems. In: *Disks, Planetesimals, and Planets*. (Eds) F. Garzón, C. Eiroa, D. de Winter et al. *ASP Conference Series* 219, *The Astronomical Society of the Pacific*, San Francisco 2000, Proceedings of a

- Conference held at Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain, 24 - 28 January 2000, 189-201.
- 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 Fundamental Plane of Gravitational Lens Galaxies and The Evolution of Early-Type Galaxies in Low-Density Environments. *The Astrophysical Journal* 543, 131-148 (2000).
- Kochanek, C.S., E.E. Falco, C.D. Impey, J. Lehar, B.A. McLeod, H.-W. Rix, C.R. Keeton, J.A. Muñoz and Y. Peng: The Infrared Einstein Ring in the Gravitational Lens MG J1131+0456 and the Death of the Dusty Lens Hypothesis. *The Astrophysical Journal* 535, 692-705 (2000).
- Köhler, R., M. Kasper and T. Herbst: T Tauri S confirmed as a binary Star. In: *Birth and Evolution of Binary Stars*. (Eds) B. Reipurth, H. Zinnecker. IAU Poster Proceedings 200, Kluwer, Dordrecht 2000, Proceedings of a Conference held at Potsdam, 10-15 April, 2000, 63.
- Köhler, R., M. Kunkel, C. Leinert and H. Zinnecker: Multiplicity of X-ray selected T Tauri stars in the Scorpius-Centaurus OB association. *Astronomy & Astrophysics* 356, 541-558 (2000).
- Krabbe, A., B.J. Sams, G. Genzel, N. Thatte and F. Prada: Near Infrared Imaging Spectroscopy of NGC 1275. *Astronomy & Astrophysics* 354, 439-452 (2000).
- Kraft, S., O. Frenzl, O. Charlier, C. Van Hoof, R.O. Katterloher, D. Rosenthal, L. Barl, U. Grözinger and J.W. Beeman: Performance of the PACS sensor arrays aboard FIRST. In: *Infrared Spaceborne Remote Sensing VIII*. (Ed.) A.M. Fowler. SPIE Proceedings 4131, SPIE, Bellingham, USA 2000, Proceedings of a Conference held at San Diego, Juli 2000, 194-204.
- Kranz, T. and H.-W. Rix: Do Massive Spiral Arms Cause Velocity Wiggles? In: *Dynamics of Galaxies: from the Early Universe to the Present*. (Eds) F. Combes, G.A. Mamon, V. Charmandaris. ASP Conference Series 197, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Paris, France, 9-13 July, 1999, 135-136.
- Krause, O., D. Lemke, U. Grözinger, a. Boehm, H. Baumeiser and R.-R. Rohloff: A Cold Focal Plane Chopper for the PACS Instrument of the FIRST satellite - Tests of an Advanced Prototype. In: *Infrared Spaceborne Remote Sensing VIII*. (Ed.) A.M. Fowler. Conference Proceedings 4131, SPIE, Bellingham, USA 2000, Proceedings of a Conference held at San Diego, July 2000, 120-131.
- Kümmel, M.W. and S.J. Wagner: A Wide Field Survey at the Northern Ecliptic Pole. I. Number Counts and Angular Correlation Functions in K. *Astronomy & Astrophysics* 353, 867 - 872 (2000).
- Kurk, J., H. Röttgering, L. Pentericci and G. Miley: Deep Ly- α Imaging of Radio Galaxy 1138-262 at redshift 2. 2. In: *Clustering at High Redshift*. (Eds) A. Mazure, O. Le Fèvre, V. Le Brun. ASP Conference Series 200, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Marseille, France, July 1999, 424.
- Kurk, J.D., H.J.A. Röttgering, L. Pentericci, G.K. Miley, W. Van Breugel, C.L. Carilli, H. Ford, T. Heckman, P. McCarthy and A. Moorwood: A Search for clusters at high redshift. I. Candidate Ly α emitters near 1138-262 at $z=2.2$. *Astronomy & Astrophysics* 358, L1-L4 (2000).
- Lagache, G., J.-L. Puget, A. Abergel, F.-X. Désert, H. Dole, F.R. Bouchet, F. Boulanger, P. Ciliegi, D.L. Clements, C. Cesarsky, D. Elbaz, A. Franceschini, R. Gispert, B. Guiderdoni, L.M. Haffner, M. Harwit, R.J. Laureijs, D. Lemke, A.F.M. Moorwood, S. Oliver, W.T. Reach, R.J. Reynolds, M. Rowan-Robinson, M. Stickel and S.L. Tufte: The Extragalactic Background and Its Fluctuations in the Far-Infrared Wavelengths. In: *ISO Surveys of a Dusty Universe, Lecture Notes in Physics*. (Eds) D. Lemke, M. Stickel, K. Wilke. 548, Springer, Heidelberg 2000, Proceedings of a Conference held at Ringberg Castle, November 1999, 81-87.
- Laureijs, R.J., U. Herbstmeier, P. Ábrahám, U. Klaas and D. Lemke: Far-infrared Properties of Small Scale Cirrus Structure. In: *ISO Beyond Point Sources: Studies of Extended Infrared Emission*. (Eds) R.J. Laureijs, K. Leech, M.F. Kessler. ESA-SP Conference Series 455, ESA, Villafranca 2000, Proceedings of a Conference held at Villafranca del Castillo, Madrid, Spain, September 14-17, 131.
- Laureijs, R.J., U. Klaas, P.J. Richards, B. Schulz and P. Ábrahám: PHT - The Imaging Photo-Polarimeter. ESA ISO Data Centre, Villafranca 2000, 1-235 p.
- Lehar, J., E.E. Falco, C.S. Kochanek, B.A. McLeod, J.A. Muñoz, C.D. Impey, H.-W. Rix, C.R. Keeton and C.Y. Peng: Hubble Space Telescope Observations of 10 Two-Image Gravitational Lenses. *The Astrophysical Journal* 536, 584-605 (2000).
- Lehtinen, K., L. Haikala, K. Mattila and D. Lemke: A far-infrared view of low mass star formation in the Cederblad 110 nebula of Chamaeleon I. *Astronomy & Astrophysics* 367, 311-332 (2000).
- Lehtinen, K., K. Mattila and D. Lemke: Far-infrared ISOPHOT observations of globules. In: *ISO beyond point sources: studies of extended infrared emission*. (Eds) R.J. Laureijs, K. Leech, M. Kessler. Conference Series 445, ESA, Noordwijk 2000, Proceedings of a Conference held at Vilsa, September 1999, 137.
- Lehtinen, K., K. Mattila, D. Lemke, L. Haikala and A. Heikkilä: ISOPHOT Far-Infrared Survey of Nearby Molecular Clouds. In: *ISO Surveys of a Dusty Universe*. (Eds) D. Lemke, M. Stickel, K. Wilke. Lecture Notes in Physics 548, Springer, Heidelberg 2000, Proceedings of a Conference held at Ringberg Castle, November 1999, 317-324.
- Leinert, C.: MIDI: 10_m interferometry with the VLTI. In: *Course Notes from the NOVA/LEIDEN/NEVEC/ESO/ESA Workshop: Summer School on Space and Ground Based Optical and Infrared Interferometry*. (Eds) I.J. Percheron, I. Montilla, L. D'Arcio. Sterrewacht Leiden, Leiden 2000, Proceedings of a Conference held at Leiden, 18-22 September, 2000, 249-263.
- Leinert, C., F. Allard, A. Richichi and P.H. Hauschildt: The Multiple System LHS 1070: a Case Study for the Onset of Dust Formation in the Atmosphere of Very Low Mass Stars. *Astronomy and Astrophysics* 353, 691-706 (2000).
- Leinert, C., U. Graser, L.B.F.M. Waters, G. Perrin, B. Lopez, V. Coudé du Foresto, A. Glazenberg-Kluttig, J.C. de Haas, T.M. Herbst, W. Jaffe, P.J. Léna, R. Lenzen, R.S. Le Poole, S. Ligorì, R. Mundt, J.-W. Pei, I.L. Porro and O. von der Lühe: 10_m interferometry on the VLTI with the MIDI instrument: a preview. In: *Interferometry in Optical Astronomy*. (Eds) P.J. Léna, A. Quirrenbach. SPIE Proceedings 4006, 2000, Proceedings of a Conference held at Munich, Germany, 27 March - 1 April, 2000, 43-53.
- 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 & Astrophysics* 367, 183-188 (2000).
- Leinert, C., S. Ligorì and J. Woitas: A Variability Study of Haro 6-10. In: *Birth and Evolution of Binary stars*. (Eds) B. Reipurth, H. Zinnecker. IAU Symposium 200, 2000, Proceedings of a Conference held at Potsdam, 10 April - 15 April 2000, 54-56.
- Lemke, D., M. Stickel and U. Klaas: A Serendipity Survey of extragalactic and galactic sources with FIRST's PACS instrument at 175 μ m (PACSSS). *PICC-MA-SD-001* 1-22 (2000).
- Lemke, D., M. Stickel and K. Wilke: ISO Surveys of a Dusty Universe. In: *ISO Surveys of a Dusty Universe*. (Eds) D.

- Lemke, M. Stickel, K. Wilke. Conference Proceedings 548, Springer, Heidelberg 2000, Proceedings of a Conference held at Ringberg Castle, 8 - 12 November 1999, 1-432.
- Lewis, G. and R. Ibata: The Search for Cosmological Black Holes: A Surface Brightness Variability Test. *The Astrophysical Journal* 549, 46-54 (2000).
- Lewis, G.F. and R. Ibata: An Investigation of Gravitational Lensing in the Southern BL Lac PKS 0537-441. *The Astrophysical Journal* 528, 650-654 (2000).
- Lewis, G.F. and R. Ibata: Probing the Atmospheres of Planets Orbiting Microlensed Stars via Polarization Variability. *The Astrophysical Journal* 539, L63-L66 (2000).
- Lewis, G.F., R. Ibata and J.S.B. Wyithe: Searching for MACHOS in Galaxy Clusters. *The Astrophysical Journal* 542, L9-L12 (2000).
- Ligori, S., U. Graser, B. Grimm and R. Klein: Design and tests of the MIDI detector subsystem. In: *Interferometry in Optical Astronomy*. (Eds) P.J. Léna, A. Quirrenbach. SPIE Proceedings 4006, SPIE, Bellingham, WA. 2000, Proceedings of a Conference held at Munich, 27-29 March, 2000, 136.
- Linden-Vørnle, M.J.D., H.U. Nørgaard-Nielsen, H.E. Jørgensen, L. Hansen, M. Haas, U. Klaas, P. Ábrahám, D. Lemke, I.L. Rasmussen and H.W. Schnopper: Deep far infrared ISOPHOT survey in "Selected Area 57". In: *ISO Surveys of a Dusty Universe*. (Eds) D. Lemke, M. Stickel, K. Wilke. Lecture Notes in Physics 548, Springer, Heidelberg 2000, Proceedings of a Conference held at Ringberg Castle, November 1999, 169-176.
- Linden-Vørnle, M.J.D., H.U. Nørgaard-Nielsen, H.E. Jørgensen, L. Hansen, U. Klaas, P. Ábrahám, D. Lemke, I.L. Rasmussen and H.W. Schnopper: Deep far infrared ISOPHOT survey in "Selected Area 57", I. Observations and source counts. *Astronomy & Astrophysics* 359, L51 (2000).
- Lonsdale, C.J., R. Hurt, H.E. Smith, D. Levine, C. Beichman, G. Helou, C.J. Cesarsky, D. Lemke, U. Klaas and D. Elbaz: The ISO-IRAS Faint Galaxy Survey: ISOCAM Imaging and Optical Spectroscopy. In: *ISO Surveys of a Dusty Universe*. (Eds) D. Lemke, M. Stickel, K. Wilke. Lecture Notes in Physics 548, Springer, Heidelberg 2000, Proceedings of a Conference held at Ringberg Castle, November 1999, 267-274.
- Lopez, B., C. Leinert, U. Graser, L.B.F.M. Waters, G. Perrin, T.M. Herbst, H.J. Röttgering, D. Rouan, B. Stecklum, R. Mundt, H. Zinnecker, P. de Laverny, M. Feldt, J.A. Meisner, A. Dutrey, T. Henning and F. Vakili: Astrophysical potentials of the MIDI VLTI instrument. In: *Interferometry in Optical Astronomy*. (Eds) P.J. Léna, A. Quirrenbach. SPIE Proceedings 4006, 2000, Proceedings of a Conference held at Munich, 27 March - 1 April, 2000, 54 - 67.
- MacLow, M.-M. and V. Ossenkopf: Characterizing the Structure of Interstellar Turbulence. *Astronomy & Astrophysics* 353, 339 (2000).
- Makarov, V.V., M. Odenkirchen and S. Urban: Internal velocity dispersion in the Hyades as a test for Tycho-2 proper motions. *Astronomy & Astrophysics* 358, 923 (2000).
- Mori, M. and A. Burkert: Gas Stripping of Dwarf Galaxies in Clusters of Galaxies. *The Astrophysical Journal* 538, 559-568 (2000).
- Naab, T. and A. Burkert: Formation of Massive Elliptical Galaxies in a Mixed Merger Scenario. In: *Dynamics of Galaxies: from the Early Universe to the Present*. (Eds) F. Combes, G. Mamon, V. Charmandaris. ASP Conference Series 197, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Paris, France, 9-13 July, 2000, 267-269.
- Nelson, A.: Observations of Binary Systems Found in Numerical Simulations. In: *Birth and Evolution of Binary Stars*. (Eds) B. Reipurth, H. Zinnecker. IAU Poster Proceedings 200, Astrophysikalisches Institut Potsdam, Potsdam 2000, Proceedings of a Conference held at Astrophysikalisches Institut Potsdam, 10 - 15 April 2000, 205-207.
- Nelson, A., J.C.B. Papaloizou, F. Masset and W. Kley: The Migration and Growth of Protoplanets in Protostellar Disks. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 318, 18-36 (2000).
- Nelson, A.F.: Planet Formation is Unlikely in Equal-Mass Binary Systems with a ~ 50 AU. *The Astrophysical Journal* 537, L65-L68 (2000).
- Nelson, A.F., W. Benz and T.V. Ruzmaikina: Dynamics of Circumstellar Disks. II. Heating and Cooling. *The Astrophysical Journal* 529, 357-390 (2000).
- O'Dell, R., W. Henney and A. Burkert: The Surprising Emission Distribution within the Helix Nebula Cometary Knots. *The Astronomical Journal* 119, 2910-2918 (2000).
- Oliver, S., M. Rowan-Robinson, D.M. Alexander, O. Almaini, M. Balcells, A.C. Baker, X. Barcons, M. Barden, I. Bellas-Velidis, F. Cabrera-Guerra, R. Carballo, C.J. Cesarsky, P. Ciliegi, D.L. Clements, H. Crockett, L. Danese, A. Dapergolas, B. Drolias, N. Eaton, A. Efstathiou, E. Egami, D. Elbaz, D. Fadda, M. Fox, A. Franceschini et al.: The European Large Area ISO Survey I: Goals, Definition and Observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 316, 749-767 (2000).
- Ortiz, J.L., P.V. Sada, L.R. Bellot Rubio, F.J. Aceituno, J. Aceituno, P.J. Gutiérrez and U. Thiele: Optical Detection of Meteoroidal Impacts on the Moon. *Nature* 405, 921-923 (2000).
- Ott, T., A. Eckart, W. Hackenberg, S. Rabien, R. Davies, S. Anders, S. Hippler and M. Kasper: Adaptive Optics with a Laser Guide Star: The ALFA System. In: *Working on the Fringe: Optical and IR Interferometry from Ground and Space*. (Eds) S. Unwin, R. Stachnik. ASP Conference Series 194, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Dana Point, California USA, 24 - 27 May 1999, 331-336.
- Ott, T., W. Hackenberg, Rabien, A. Eckart and S. Hippler: The ALFA Laser: Beam Relay and Control System. *Experimental Astronomy* 10, 89-101 (2000).
- Pel, J.-W., A.W. Glazenberg-Kluttig, J.C. de Haas, H. Hanenburg and R. Lenzen: Cold optics of MIDI: the mid-infrared interferometric instrument for the VLTI. In: *Interferometry in Optical Astronomy*. (Eds) P. Lena, A. Quirrenbach. Proceedings of the SPIE 4006, SPIE, Bellingham, WA, USA 2000, Proceedings of a Conference held at Munich, 27 March - 1 April, 2000, 164-173.
- Pentericci, L., J.D. Kurk, H.J.A. Röttgering, G.K. Miley, W. vanBreugel, C.L. Carilli, H. Ford, T. Heckman, P. McCarthy and A. Moorwood: A search for clusters at high redshift. II. A proto cluster around a radio galaxy at $z=2.16$. *Astronomy & Astrophysics* 361, L25-L28 (2000).
- Pentericci, L., W. Van Reeve, C.L. Carilli, H.J.A. Röttgering and G.K. Miley: VLA radio continuum observations of a new sample of high redshift radio galaxies. *Astronomy & Astrophysics Supplement Series* 145, 121-159 (2000).
- Petitjean, P., B. Aracil, R. Srianand and R. Ibata: Structure of the Mg bt II and damped Lyman-alpha systems along the line of sight to APM 08279+5255. *Astronomy & Astrophysics* 359, 457-470 (2000).
- Porro, I.L., T. Berkefeld and C. Leinert: Simulation of the effects of atmospheric turbulence on mid-infrared visibility measurements with the Mid-Infrared Interferometric Instrument for the Very Large Telescope Interferometer. *Applied Optics* 39, 1643-1651 (2000).
- Porro, I.L., U. Graser, C. Leinert, B. Lopez and O. von der Lühe: Estimated Performance for 10-micron Interferometry at the VLTI with the MIDI Instrument. In: *Working on the Fringe:*

- Optical and IR Interferometry from Ground and Space. (Eds) S. Unwin, R. Stachnik. ASP Conference Series 194, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Dana Point, California, USA, 24 - 27 May 1999, 325-330.
- Rabien, S., T. Ott, W. Hackenberg, Eckart, R.I. Davies, Kasper and A. Quirrenbach: The ALFA Laser and Analysis Tools. *Experimental Astronomy* 10, 75-88 (2000).
- Rafanelli, P., A. Rifatto, V. Afanasiev, S. Dodonov, K. Birkle, P. Böhm, C. Cannavacciuolo, G. Richter, J. Vennik, T. Boller and M. Radovich: Merging Signatures in the Core of Mkn 938: The Disturbed Structure of the Nuclear Region of Mkn 298. In: *Imaging the Universe in Three Dimensions*. (Eds) W. van Breugel, J. Bland-Hathorne. ASP Conference Series 195, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Walnut Creek, CA., 29 March - 1 April, 2000, 232-235.
- Rebolo, R., M.R. Zapatero Osorio, V.J.S. Béjar, D. Barrado y Navascues, C.A.L. Bailer-Jones, R. Mundt and E.L. Martín: Very Young Free-Floating Planets in the ρ Orionis Star Cluster. In: *Disks, Planetesimals, and Planets*. (Eds) F. Garzón, C. Eiroa, D. de Winter et al. ASP Conference Series 219, The Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain, 24 - 28 January 2000, 515-522.
- Richichi, A., G. Calamai, F. Lisi, B. Stecklum, T. Herbst and E. Thamm: The Peculiar Object IRAS 06088+1909. In: *The Carbon Star Phenomenon*. (Ed.) R.F. Wing. IAU Symposium 177, Kluwer, Dordrecht 2000, Proceedings of a Conference held at Antalya, Turkey, 27 - 31 May 1996, 575.
- Richichi, A. and C. Leinert: A New Observation of the Triple-System Haro 6-37. In: *Birth and Evolution of Binary Stars*. (Eds) B. Reipurth, H. Zinnecker. IAU Poster Proceedings 200, Astrophysikalisches Institut Potsdam, Potsdam 2000, Proceedings of a Conference held at Astrophysikalisches Institut Potsdam, 10 - 15 April 2000, 83-84.
- Rifatto, A., P. Rafanelli, V. Afanasiev, S. Dodonov, K. Birkle, P. Böhm, T. Boller, M. Radovich, G. Richter and J. Vennik: The Disturbed Structure of the Nuclear region of Mkn 298. In: *Imaging the Universe in Three Dimensions*. (Eds) W.v. Breugel, J. Bland-Hathorne. ASP Conference Series 195, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Walnut Creek, California, USA, 29 March - 1 April 1999, 337-340.
- Rohloff, R.-R., W. Laun, U. Graser, N. Ortlieb and M. Leborg: Cryo design for the VLT MIDI instrument. In: *Interferometry in Optical Astronomy*. (Eds) P. Lena, A. Quirrenbach. SPIE Proceedings 4006, SPIE, Bellingham 2000, Proceedings of a Conference held at Munich, 27-29 March 2000, 277-288.
- Röser, H.-J., K. Meisenheimer, M. Neumann, R.G. Conway and R.A. Perley: The jet of 3C273 observed with ROSAT HRI. *Astronomy & Astrophysics* 360, 99-106 (2000).
- Rousselot, P., C. Arpigny, H. Rauer, R. Gredel, J. Manfroid and A. Fitzsimmons: A fluorescence model of the C 3 radical in comets. *American Astronomical Society Meeting* 32, 4101 (2000).
- Rudnick, G., H.-W. Rix and M. Franx: The Rest-Frame Optical Properties of Galaxies to $z=3$. *American Astronomical Society Meeting* 197, 11702 (2000).
- Rudnick, G., H.-W. Rix and R.C.J. Kennicutt: Lopsided Galaxies, Weak Interactions and Boosting the Star Formation Rate. *The Astrophysical Journal* 538, 569-580 (2000).
- Rudnick, G., H.-W. Rix, A. Moorwood, H. Roettgering, P. van der Werf, K. Kuijken, P. van Dokkum and I. Labbe: The Evolution of Galaxies in the HDF South with FIRES at the VLT. *American Astronomical Society Meeting* 196, 5604 (2000).
- Sabin, T.J., C.A.L. Bailer-Jones and P.J. Withers: Accelerated learning using Gaussian process models to predict static recrystallisation in an Al-Mg alloy Modelling and Simulation in Materials. *Science and Engineering* 8, 687-706 (2000).
- Salucci, P. and A. Burkert: Dark Matter Scaling Relations. *The Astrophysical Journal* 537, L9-L12 (2000).
- Sandquist, E., R.E. Taam and A. Burkert: On the Formation of Helium Double Degenerate Stars and Pre-Cataclysmic Variables. *The Astrophysical Journal* 533, 984-997 (2000).
- Sarzi, M., E.M. Corsini, A. Pizzella, J.C. Vega Beltran, M. Cappellari, J.G. Funes and F. Bertola: NGC 4672: A new case of an early-type disk galaxy with an orthogonally decoupled core. *Astronomy & Astrophysics* 360, 439-446 (2000).
- Schmidtobreick, L., M. Haas and D. Lemke: The bright 175 μ m knots of the Andromeda Galaxy. *Astronomy & Astrophysics* 363, 917-925 (2000).
- Schmidtobreick, L., M. Haas and D. Lemke: The bright FIR knots in M31. In: *The Interstellar Medium in M31 and M33*. (Eds) E.M. Berkhuijsen, R. Beck. Proceedings of the WE-Heraeus Seminar 232, Shaker Verlag, Aachen 2000, Proceedings of a Conference held at Bad Honnef, Germany, Mai 2000, 73.
- Scholz, R.-D., M. Irwin, R. Ibata, H. Jahreiß and O.Y. Malkov: New high-proper motion survey in the Southern sky. *Astronomy & Astrophysics* 353, 958-969 (2000).
- Seitzer, P., E.K. Grebel, A. Dolphin, D. Geisler, Guhathakurta, P.W. Hodge, I. Karachentsev, V. Karachentseva and A. Sarajedini: The HST Snapshot Survey of Nearby Dwarf Galaxy Candidates: Summary of Current Results. *American Astronomical Society Meeting* 196, 2901 (2000).
- Serjeant, S., S. Oliver, M. Rowan-Robinson, H. Crockett, V. Missoulis, T. Sumner, C. Gruppioni, R.G. Mann, N. Eaton, D. Elbaz, D.L. Clements, A.C. Baker, A. Efstathiou, C.J. Cesarsky, L. Danese, A. Franceschini, R. Genzel, A. Lawrence, D. Lemke, R.G. McMahon, G. Miley, J.-L. Puget and B. Rocca-Volmerange: The European Large Area ISO Survey II: Mid-infrared extragalactic source counts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 316, 768-778 (2000).
- Shields, J.C., H.-W. Rix, L.C. Ho, G. Rudnick, D.H. McIntosh, M. Sarzi, A. Barth, A.V. Filippenko and W.L.W. Sargent: Detecting Black Holes in Bulges and Measuring their Masses. *American Astronomical Society Meeting* 196, 2115 (2000).
- Shields, J.C., H.-W. Rix, D.H. McIntosh, L.C. Ho, G. Rudnick, A.V. Filippenko, W.L.W. Sargent and M. Sarzi: Evidence for a Black Hole and Accretion Disk in the LINER NGC 4203. *The Astrophysical Journal* 534, L27-L30 (2000).
- Shigeru, I., J. Larwood and A. Burkert: Evidence of Early Stellar Encounter in the Orbital Distribution of Edgeworth-Kuiper Belt Objects. *The Astrophysical Journal* 528, 351-356 (2000).
- Smith, M.D., M.-M. Mac Low and F. Heitsch: The Distribution of Shock Waves in Driven Supersonic Turbulence. *Astronomy & Astrophysics* 362, 333-341 (2000).
- Smith, M.D., M.-M. Mac Low and J.M. Zuev: The Shock Waves in Decaying Supersonic Turbulence. *Astronomy & Astrophysics* 356, 287-300 (2000).
- Song, I., J.-P. Caillault, D. Barrado y Navascues, J.R. Stauffer and S. Randich: Age of late Spectral Type Vega-like Stars. *The Astrophysical Journal* 533, 41-44 (2000).
- Soubiran, C., M. Odenkirchen and J.-F.L. Campion: Fundamental properties of the open cluster NGC 2355. *Astronomy & Astrophysics* 357, 484 (2000).
- Stickel, M., D. Lemke, C.A. Beichman, M.F. Kessler, M. Rowan-Robinson, A. Efstathiou, S. Bogun, M.F. Kessler and G. Richter: The ISOPHOT 170 μ m Serendipity Survey. I. Compact Sources with Galaxy Associations. *Astronomy & Astrophysics* 359, 865-875 (2000).

- Stickel, M., D. Lemke, U. Klaas, S. Hotzel, L.V. Tóth, M.F. Kessler, R.J. Laureijs, M. Burgdorf, C.A. Beichman, M. Rowan-Robinson, A. Efstathiou, S. Bogun, G. Richter and M. Braun: ISOPHOT 170 _m Serendipity Sky Survey: The First Galaxy Catalogue. In: ISO Surveys of a Dusty Universe. (Eds) D. Lemke, M. Stickel, K. Wilke. Lecture Notes in Physics 548, Springer, Heidelberg 2000, Proceedings of a Conference held at Ringberg Castle, November 1999, 251-258.
- Surace, C., A. Efstathiou, P. Héraudeau, D. Lemke, S. Oliver, M. Rowan-Robinson and E. Consortium: The European Large Area ISO Survey: ISOPHOT Final Analysis - Number Counts. In: ISO Surveys of a Dusty Universe. (Eds) D. Lemke, M. Stickel, K. Wilke. Lecture Notes in Physics 548, Springer, Heidelberg 2000, Proceedings of a Conference held at Ringberg Castle, November 1999, 36-39.
- Tóth, L.V., S. Hotzel, O. Krause, K. Lehtinen, D. Lemke, K. Mattila, M. Stickel and R.J. Laureijs: ISOPHOT Serendipity Survey observations of interstellar clouds. I. Detection of the coldest cores in Chamaeleon. *Astronomy & Astrophysics* 364, 769-779 (2000).
- Travaglio, C., A. Burkert, D. Galli and A. Noels: Inhomogeneous Chemical Evolution of the Galactic Halo. In: The Galactic Halo: from Globular Clusters to Field Stars. (Eds) P. Magain, D. Caro, E. Jehin et al. Liège International Astrophysical Colloquium 35, D. Caro, Liège 2000, Proceedings of a Conference held at Liège, July 5-8, 1999, 135.
- 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 (2000).
- Winn, J.N., J.N. Hewitt, P. Schechter, A. Dressler, E.E. Falco, C.D. Impey, C.S. Kochanek, J. Lehar, J.E.J. Lovell, B.A. McLeod, N.D. Morgan, J.A. Muñoz, H.-W. Rix and M.T. Ruiz: PMN J1838-3427: A New Gravitationally Lensed Quasar. *The Astronomical Journal* 120, 2868-2878 (2000).
- Woitas, J. and C. Leinert: Orbital Motion in T Tauri Binary Systems. In: Star Formation 2000. (Eds) O. Kessel-Deynet, A. Burkert. Max-Planck-Institut für Astronomie und Astrophysikalisches Institut Jena, Heidelberg 2000, Proceedings of a Conference held at Ringberg Castle, 21 - 24 June 2000, 33-34.
- Woitas, J. and C. Leinert: Properties of the components in close T Tauri binary systems. In: Birth and Evolution of Binary stars. (Eds) B. Reipurth, H. Zinnecker. IAU Poster Proceedings 200, Astrophysikalisches Institut Potsdam, Potsdam 2000, Proceedings of a Conference held at Potsdam, 10 - 15 April, 2000, 57-59.
- Woitas, J., C. Leinert, H. Jahreiß, T. Henry, O.G. Franz and L.H. Wassermann: The Nearby M-Dwarf System Gliese 866 Revisited. *Astronomy & Astrophysics* 353, 253-256 (2000).
- Wolf, C., K. Meisenheimer and H.-J. Röser: Multicolor Classification of Astronomical Objects. In: Computer Vision and Applications. A guide for Students and Practitioners, (Eds.) B. Jähne, H. Hauecker. Academic Press, San Diego / London 2000, 656-657.
- Wolf, C., K. Meisenheimer, H.-J. Röser, S.V.W. Beckwith, R. Fockenbrock, H. Hippelein, B. von Kuhlmann, S. Phleps and E. Thommes: Have Most High-Redshift Quasars Been Overlooked? In: Imaging the Universe in Three Dimensions: Astrophysics with Advanced Multi-Wavelength Devices. (Eds) W. van Breugel, J. Bland-Hathorne. ASP Conference Series 195, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 2000, Proceedings of a Conference held at Walnut Creek, California, USA, 29 March - 1 April 1999, 398-403.
- Zapatero Osario, M.R., V. Béjar, E.L. Martín, R. Rebolo, D. Barrado y Navascués, C.A.L. Bailer-Jones and R. Mundt: Discovery of very young, free floating giant planets in the Sigma Orionis cluster. *Science* 290, 103-107 (2000).
- Zaritsky, D., J. Harris, E.K. Grebel and I. Thompson: The Morphologies of the Small Magellanic Cloud. *The Astrophysical Journal* 534, L53-L56 (2000).

Diplomarbeiten:

- Krause, O.: Ein Chopper für das Spektrophotometer PACS im Weltraumteleskop FIRST. Diploma Thesis University Heidelberg 2000.

Dissertationen:

- Baumann, O.: Erstellung einer Galaxienhaufen-Stichprobe auf der Grundlage eines tiefen photographischen Datensatzes. PhD Thesis University Heidelberg 2000.
- Kasper, M.: Optimization of an adaptive optics system and its application to high-resolution imaging spectroscopy of T Tauri. PhD Thesis University Heidelberg 2000.
- Naab, T.: Structure and dynamics of interacting galaxies. PhD Thesis University Heidelberg 2000.



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 2.3 Milliarden DM im Jahr 2000 beschäftigt sie rund 11 000 Mitarbeiter, von denen etwa ein Viertel Wissenschaftler sind. Zusätzlich forschen im Jahresverlauf rund 6.900 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