

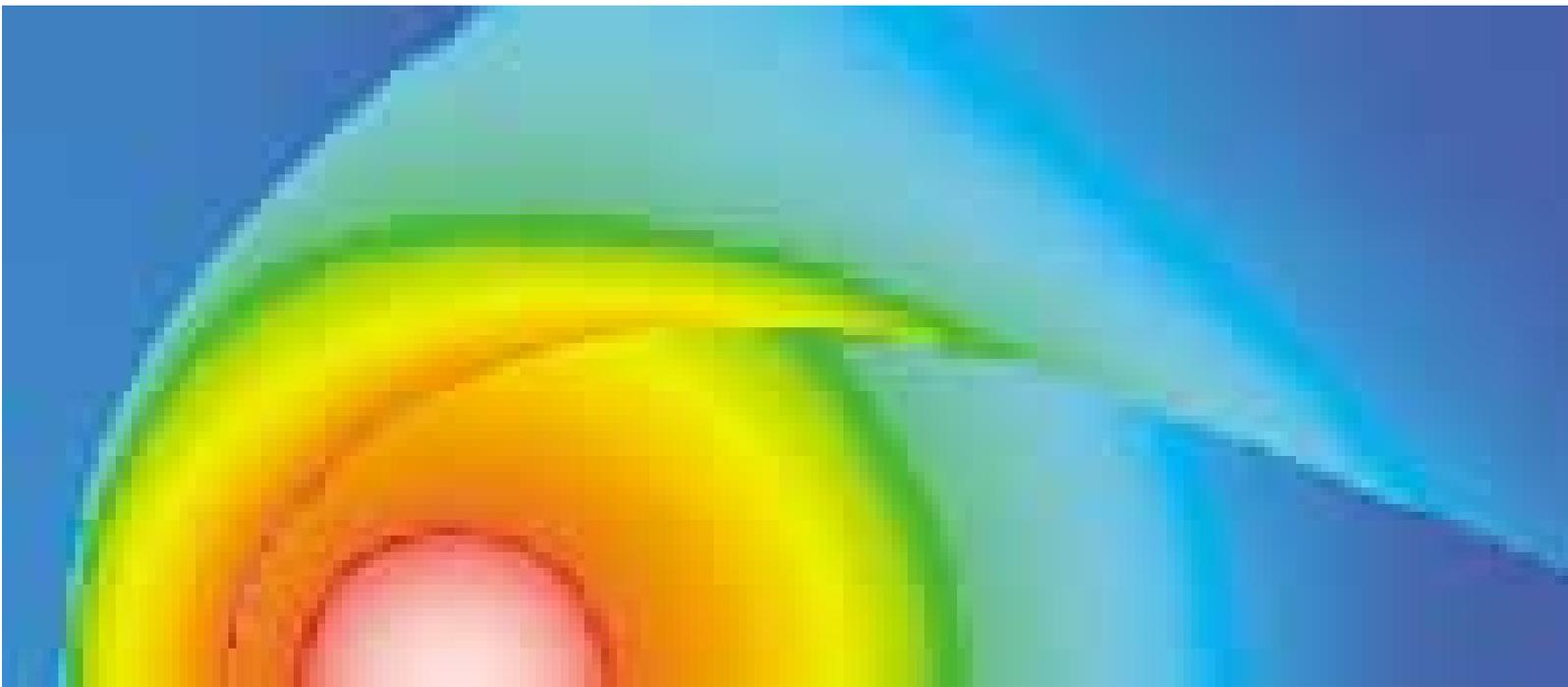


Max-Planck-Institut für Astronomie

Heidelberg-Königstuhl

Jahresbericht

1999



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Zum Titelbild:

Im heißen Teilchenwind des intergalaktischen Mediums verlieren Zwerggalaxien innerhalb weniger Milliarden Jahre ihr interstellares Gas. Theoretische Studien zu diesem Prozess werden auf den Seiten 64–67 beschrieben.

Max-Planck-Institut für Astronomie

Heidelberg-Königstuhl

Jahresbericht

1999



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

Fachbeirat:

Prof. R. Bender, München; Prof. R.-J. Dettmar, Bochum; Prof. G. Hasinger, Potsdam; Prof. P. Léna, Meudon; Prof. M. Moles Villamante, 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 186 Mitarbeiter (einschließlich Drittmittelbeschäftigten) am Institut, darunter 34 Wissenschaftler. Dazu kamen 30 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

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

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

Calar-Alto-Observatorium

Anschrift: Centro Astronomico Hispano Aleman

Calle Jesus 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

Layout: Josef Hegele

Druck: Colordruck Leimen

ISSN 1437-2924 – Internet: ISSN 1617-0490

Inhalt

I Allgemeines	5	Vom massearmen Stern zum Braunen Zwerg.....	46
I.1 Forschungsziele des MPIA.....	5	Das Dreiersystem Gliese 866.....	47
Das Calar-Alto-Observatorium.....	5	Das Vierersystem LHS 1070.....	47
Internationale Zusammenarbeit.....	6	Staubwolken am Himmel Brauner Zwerge.....	49
Extraterrestrische Forschung.....	8	Kandidaten für Braune Zwerge in M 35.....	50
Lehre und Öffentlichkeitsarbeit.....	10	Neue Altersskala für Sternhaufen.....	51
I.2 Wissenschaftliche Fragestellungen.....	11	Die Methode der Lithiumanreicherung.....	51
Galaktische Forschung.....	11	Das Alter der »Scheibensterne«.....	53
Extragalaktische Forschung.....	11	Beta Pictoris.....	54
Das Sonnensystem.....	12	Formalhaut und Wega.....	55
II Highlights	13	Die Balkenstruktur im Innern der Milchstraße.....	56
II.1 CADIS und die Entwicklung der Galaxien.....	13	Galaktischer Balken erklärt HIPPARCOS-Daten.....	56
3000 Galaxien zur Bestimmung von Leuchtkraft- funktionen.....	13	CADIS liefert Erkenntnisse zur Struktur der Milch- straße.....	58
Hat sich die Leuchtkraftfunktion zeitlich entwi- ckelt?.....	14	Die Struktur unserer Galaxis.....	58
II.2 Astrophysik mit Gravitationslinsen.....	16	Klassifizierung von 300 Sternen.....	59
Das CASTLES-Projekt.....	17	Dünne und dicke galaktische Scheibe.....	59
Kritischer Punkt: die Modelle.....	18	Der Halo.....	60
Der Einstein-Ring MG 1131+0456.....	19	Die Leuchtkraftfunktion.....	60
Die Hubble-Konstante.....	20	Erst der Anfang.....	61
Die Entwicklung elliptischer Galaxien.....	23	IV.2. Extragalaktische Astronomie.....	62
II.3 Kohlenwasserstoffe – rätselhafte Akteure im Staub.....	24	Eine Zufallsdurchmusterung mit ISO liefert bedeu- tenden Galaxienkatalog.....	62
Interstellarer Zirkus.....	24	Erster Galaxienkatalog.....	62
Diffuser Staub in der Milchstraße.....	26	Kalter Staub in Spiralgalaxien.....	62
Die Spiralgalaxie NGC 891.....	26	Wenn Zwerggalaxien ihr Gas verlieren.....	64
Eigenschaften der PAHs.....	28	Zwerggalaxien im Teilchenwind.....	65
III Instrumentelle Entwicklungen	31	Wie Spiralgalaxien zu elliptischen Galaxien ver- schmelzen.....	67
ALFA – Adaptive Optik mit künstlichem Stern.....	31	Staub in Quasaren.....	72
LAICA – die Weitfeldkamera für den Calar Alto.....	33	Schwarze Löcher und Sternentstehungsgebiete.....	72
CONICA – hochauflösende Infrarotkamera für das VLT.....	34	Aufschlussreiche Korrelationen.....	74
MIDI – Infrarotinterferometer für das VLT.....	35	Quasare und ultraleuchtkräftige Infrarotgalaxien.....	75
PACS – Infrarotkamera für FIRST.....	36	IV.3. Das Sonnensystem.....	76
Ein neuer Sekundärspiegel für UKIRT.....	37	Störte ein naher Stern die Entstehung der Planeten?.....	76
IV Wissenschaftliche Arbeiten	39	Drei Gruppen von Kuiper-Objekten.....	77
IV.1. Galaktische Astronomie.....	39	Wirbelte ein naher Stern die Kuiper-Population durcheinander?.....	77
Staub um junge massereiche Sterne – Hüllen oder Scheiben?.....	39	Personal	81
Junge Planeten auf Wanderschaft.....	42	Arbeitsgruppen	81
Planeten jenseits der Schneegrenze.....	43	Zusammenarbeit mit Firmen	84
Wie ein Planet Drehimpuls verliert.....	44	Lehrveranstaltungen	87
		Öffentliche Vorträge	87
		Tagungen	88
		Mitarbeit in Gremien	89
		Veröffentlichungen	90

I Allgemeines

I.1 Forschungsziele des MPIA

Das Calar-Alto-Observatorium

Der Senat der Max-Planck-Gesellschaft beschloss im Jahre 1967 die Gründung des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg mit dem Ziel, die durch zwei Weltkriege weit zurückgeworfene astronomische Forschung in Deutschland wieder an die Weltspitze heranzuführen. Zwei Jahre später nahm das Institut auf dem Königstuhl unter der Leitung von Hans Elsässer in proviso-



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

rischen Räumen die Arbeit auf. Das neue Institutsgebäude wurde 1975 bezogen (Abb. I.1). Als langfristiges Ziel wurde dem neu gegründeten MPIA der Aufbau und Betrieb zweier leistungsfähiger Observatorien jeweils auf der Nord- und Südhalbkugel übertragen. Nach intensiver Standortsuche fiel 1970 für die Nordhalbkugel die Wahl auf den 2168 Meter hohen Berg Calar Alto in der Provinz Almeria, Südspanien. Er bietet in Europa gute klimatische und meteorologische Bedingungen für astronomische Beobachtungen. 1972 kam es zur Gründung des »Deutsch-Spanischen Astronomischen Zentrums« (DSAZ), kurz Calar-Alto-Observatorium.

Die mit der Planung und dem Bau der Teleskope verbundenen komplexen technologischen Probleme wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Carl Zeiss, Oberkochen und anderen Firmen gelöst. Auf diese Weise haben sich zahlreiche Unternehmen ein Know how angeeignet, das ihnen zu einer Führungsposition auf dem Weltmarkt verholfen hat.

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

Abb. I.2: Die Kuppel des 3.5-Meter-Teleskops auf dem Calar Alto.





Abb. I.3: ALFA am Cassegrain-Flansch des 3.5-Meter-Teleskops, zusammen mit der golden schimmernden Kamera OMEGA.

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

Die heutige Aufgabe des MPIA besteht zum einen im Betrieb des Calar-Alto-Observatoriums. Dazu gehört die ständige Optimierung der Leistungsfähigkeit der Teleskope: Mit der Inbetriebnahme der adaptiven Optik ALFA (Abb. I.3) steht das 3.5-m-Teleskop heute wieder an der vordersten Front der technologischen Entwicklung (Kapitel III). Zum anderen werden in Heidelberg neue Messgeräte entwickelt, Beobachtungsprogramme vorbereitet und die an den Teleskopen gewonnenen Daten ausgewertet. Ein wesentlicher Teil der Institutsarbeit ist dem Bau neuer

Instrumente für die Teleskope gewidmet (Kapitel III). Dazu ist das MPIA mit modernsten Feinwerktechnik- und Elektronikwerkstätten ausgestattet. Mit dem Calar-Alto-Observatorium verfügt das MPIA über eines der beiden leistungsstärksten Observatorien Europas. Die Forschung konzentriert sich auf den »klassischen« sichtbaren und auf den infraroten Spektralbereich.

Internationale Zusammenarbeit in der bodengebundenen Astronomie

Von wesentlicher Bedeutung sind auch Beteiligungen an internationalen bodengebundenen Observatorien und Projekten. So arbeitet seit mehreren Jahren an einem der größten Teleskope der Nordhalbkugel, dem britischen 3.9-Meter-Teleskop UKIRT (United Kingdom Infrared Telescope) auf Hawaii, die am MPIA gebaute IR-Kamera MAX (Mid-Infrared Array eXpandable). 1996 erhielt das Teleskop einen leichtgewichtigen Tip-tilt-Sekundärspiegel, der unter Federführung des MPIA gebaut worden war. Im Berichtsjahr wurde ein neuer Spiegel mit noch höherer Oberflächengenauigkeit geliefert. Mit ihm ist es möglich, im nahen Infrarot beugungsbegrenzte Aufnahmen mit einer Auflösung von 0.3 Bogensekunden zu erzielen (Abb. I.4) (s. Kapitel III). Im Gegenzug erhalten die Heidelberger Astronomen einen festen Anteil der Beobachtungszeit an diesem Teleskop.

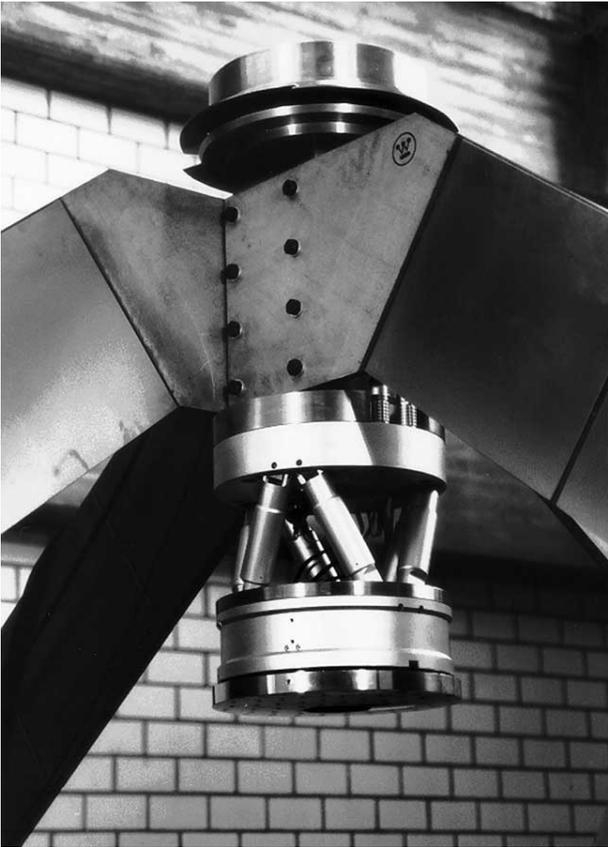


Abb. I.4: Die neue Sekundärspiegeleinheit des UKIRT mit einem Spiegeldummy in der Werkstatt des MPIA.

Abb. I.5: Die vier Großteleskope des Very Large Telescope und die bereits arbeitenden oder im Bau befindlichen wissenschaftlichen Instrumente.

Für das zukünftig größte Observatorium der Erde, das von ESO gebaute Very Large Telescope (VLT) auf dem Paranal in Chile, entsteht unter der Federführung des MPIA die hochauflösende Infrarotkamera CONICA. Ebenfalls begonnen wurde mit dem Bau von MIDI, einem interferometrischen Instrument für das VLT (Abb. I.5) (s. Kapitel III). Mit diesem zukunftsweisenden Gerät soll es ab dem Jahre 2002 erstmals möglich sein, das Licht zweier Großteleskope im infraroten Spektralbereich interferometrisch zu koppeln.

Darüber hinaus ist das MPIA maßgeblich am Large Binocular Telescope (LBT, Abb. I.6) beteiligt. Das LBT ist eine Art Doppelfernrohr, in dem zwei Spiegel mit einem Durchmesser von jeweils 8.4 Metern auf einer gemeinsamen Montierung angebracht werden. Beide Spiegel verfügen zusammen über eine Lichtsammelkraft, die der eines einzelnen 11.8-Meter-Spiegels gleich kommt. Damit wird das LBT nach seiner voraussichtlichen Inbetriebnahme im Jahre 2004 das weltweit leistungsstärkste Einzelteleskop sein. Zudem ist geplant, das Doppelfernrohr für interferometrische Beobachtungen einzusetzen. Dann entspricht seine räumliche Auflösung der eines Spiegels 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« 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 voraussichtlich 25 % an den Kosten und der Nutzung des LBT beteiligt sein.

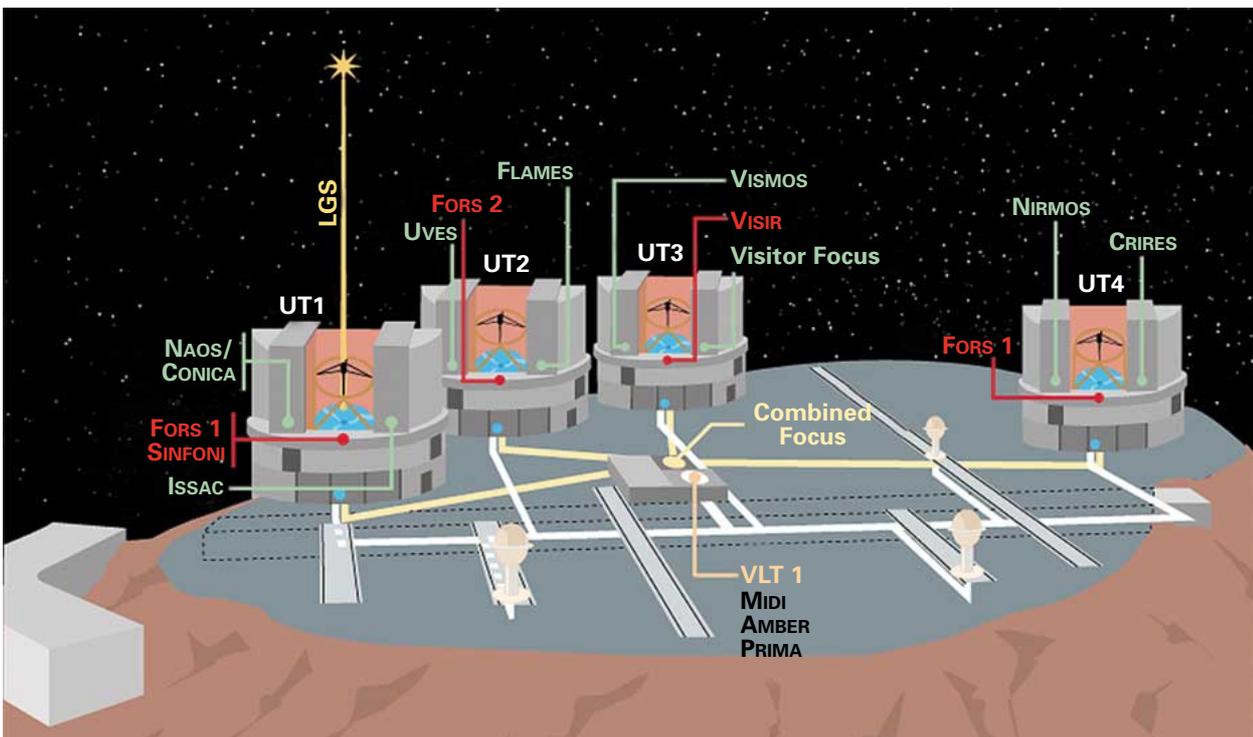




Abb. 1.6: Das Large Binocular Telescope (LBT) auf dem Mount Graham wird in wenigen Jahren zu den leistungsfähigsten Observatorien der Erde gehören.

Extraterrestrische Forschung

Das MPIA engagiert sich seit seiner Gründung auch in der extraterrestrischen Forschung. Insbesondere der damit verbundene frühzeitige Einstieg in die Infrarotastronomie war für die gesamte spätere Entwicklung des Instituts von Bedeutung. In den 70er Jahren wurden am MPIA zwei Photometer entwickelt und gebaut, die auf den beiden Sonnensonden Helios 1 und 2 geflogen sind und dort fehlerfrei arbeiteten. Dazu etwa parallel lief die Entwicklung der Ballongondel THISBE (Telescope of Heidelberg for In-

frared Studies by Balloon-borne Experiments). Dieser Höhenforschungsballon war ausgelegt, Teleskope und Ausrüstung mit bis zu 400 Kilogramm Gewicht bis in 40 Kilometer Höhe zu tragen, wo Infrarotbeobachtungen möglich sind. Vier Teleskope mit Öffnungen von 6 bis 20 Zentimetern wurden in den Werkstätten des MPIA gebaut und kamen auf THISBE zum Einsatz. Wissenschaftlich besonders hervorzuheben sind hier die erste Beobachtung des Zentralgebietes der Milchstraße bei $2.4 \mu\text{m}$ Wellenlänge und die Messung des Airglow, einer schwachen Lumineszenz des OH-Radikals in der Atmosphäre.

Heute ist das MPIA wesentlich an dem Projekt ISO (Infrared Space Observatory) der Europäischen Welt- raumbehörde ESA beteiligt: ISOPHOT, eines von vier Mess- instrumenten auf ISO, entstand unter der Federführung des Instituts. ISO lieferte über zwei Jahre lang exzellente Daten

und wurde am 8. April 1998 abgeschaltet, nachdem sein Kühlmittelvorrat erschöpft war. Mittlerweile sind zahlreiche Arbeiten aus allen Bereichen der Astronomie erschienen, welche die Leistungsfähigkeit dieses Weltraumteleskops dokumentieren.

Im Sommer 1998 hat für ISO die drei Jahre dauernde postoperative Phase begonnen. In dieser Zeit müssen die Daten sorgfältig kalibriert und archiviert werden. Der Erstellung eines nach objektiven Kriterien übersichtlich geordneten Archivs kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Zur Lösung dieser Aufgabe richtete die ESA in ihrer Station in Villafranca, Spanien, 1998 ein Zentralarchiv ein und daneben bauten die vier Institute, unter deren Leitung die Instrumente entstanden sind, ihrerseits je ein Datenzentrum auf.

Gemäß einer Vereinbarung mit der ESA ist das ISO-PHOT-Datenzentrum am MPIA (Abb. I.7) ein Knoten in diesem internationalen Netz von sechs 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.

Im zweiten Jahr der postoperativen Phase wurden die Arbeiten zur Programmentwicklung und Kalibrationsanalyse für eine neue Version der automatischen Datenanalyse abgeschlossen. Die neue Version brachte weitere Verbesserungen in der photometrischen Kalibration, insbesondere für schwache Quellen. Gleichzeitig ließ sich die Genauigkeit für so genannte gepochte Punktquellenmessungen steigern. Bei diesen Beobachtungen wird abwechselnd das eigentliche Beobachtungsobjekt und ein Hintergrundfeld als Referenz gemessen. Das Hauptziel der neuen Software-Entwicklung war die Verbesserung der gepochten Photometrie, die mit etwa 3000 Beobachtungen rund 20 % aller ISOPHOT-Messungen ausmacht.

Neben der reinen Archivierung und Rekalibrierung fungiert das Heidelberger Datenzentrum vor allem auch als Service-Einrichtung für Astronomen. 1999 wurden etwa 50 Besucher betreut. Die Einrichtung ist bis Ende 2001 finanziert. Ziel all dieser Anstrengungen ist letztlich die wissenschaftliche Interpretation der Daten und der



Abb. I.7: Das Astrolabor auf dem Königstuhl, in dem heute das ISOPHOT-Datenzentrum untergebracht ist.

daraus resultierende Erkenntnisfortschritt in der Astronomie.

Auf wissenschaftlicher Seite stand die Veröffentlichung des ersten Punktquellenkatalogs der Zufallsdurchmusterung bei 170 μm Wellenlänge im Vordergrund (Kapitel IV.2). Gleichzeitig gab es auch bedeutende Forschungsbeiträge zu zirkumstellaren Staubhüllen um junge Sterne (Kapitel IV.1), zu polizyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen im interstellaren Medium (Kapitel IV.1.) und zu Staub in Quasaren (Kapitel IV.2.)

Die mit ISOPHOT gesammelte Erfahrung war ausschlaggebend dafür, dass das MPIA an dem Bau der Infrarotkamera PACS wesentlich beteiligt ist. Diese Kamera wird an Bord von FIRST, des Far-Infrared and Submillimeter Telescope der ESA arbeiten (Kapitel III). Der Start dieses satellitengestützten 3.5-Meter-Weltraumteleskops ist für das Jahr 2007 vorgesehen.

Das Institut beteiligt sich an einem Satellitenexperiment, das die Johns Hopkins University in Baltimore der NASA vorgeschlagen hat. Das PRIME (Primordial Explorer) genannte Teleskop soll im Bereich von 0.9 bis 3.4 μm Wellenlänge einen Großteil des Himmels bis zu einer scheinbaren Helligkeit von 24.5 mag. kartieren. PRIME wäre ein Vorläufer des geplanten Hubble-Nachfolgers, des New Generation Space Telescope. Er bestünde aus einem 75-cm-Teleskop, das in einer zirkularen polaren Umlaufbahn in einer Höhe von 650 km die Erde umkreist. Die Fokalebene des Teleskops ist über drei Spiegel in vier Wellenlängenkanäle aufgeteilt, die mit neu entwickelten Infrarot-Arrays mit 2000×2000 Pixeln bestückt werden.

Mit einzelnen, jeweils 150 Sekunden dauernden Belichtungen ließe sich innerhalb von drei Jahren ein Viertel des gesamten Himmels abrastern. Im Vergleich zu der derzeit empfindlichsten Himmelsdurchmusterung im nahen Infrarot, dem amerikanischen 2 Micron Astronomical Sky Survey (2MASS), wäre eine Empfindlichkeitssteigerung um einen Faktor 1000 zu erwarten, was für die Untersuchung des sehr frühen Universums einen wesentlichen Schritt bedeuten würde. Damit könnte PRIME praktisch auf allen Gebieten der modernen Astronomie wesentlich neues Datenmaterial bringen. So könnte das Teleskop beispielsweise im Rotverschiebungsbereich $1 < z < 5$ mindestens 1000 Supernovae vom Typ Ia finden und ihre Lichtkurve messen, Hunderte von Braunen Zwergen bis in eine Entfernung von 1000 Parsec, extrasolare Planeten der Größe Jupiters bis in eine Entfernung von 50 Parsec, Quasare bis $z = 25$ oder Protogalaxien bis $z = 20$ finden.

Falls dieser Vorschlag in das Programm der NASA übernommen wird, kann im Sommer 2000 mit der Phase A seiner Entwicklung begonnen werden und der Satellit im Frühjahr 2004 starten.

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

Das Institut verdankt seinem Standort in Heidelberg die Möglichkeit, in einem astronomisch besonders aktiven Umfeld zu wirken: Eine Zusammenarbeit mit der Landessternwarte, dem Astronomische Rechen-Institut, dem Institut für Theoretische Astrophysik der Universität oder der Abteilung Kosmophysik des MPI für Kernphysik hat sich immer wieder in vielfältiger Weise ergeben. Besonders augenfällig und zielgerichtet findet sie in dem langjährigen Sonderforschungsbereich Nr. 1700 (»Galaxien im jungen Universum«) statt, an dem alle genannten Heidelberger Institute mit wesentlichen Teilen ihrer Kräfte beteiligt sind.

Lehre und Öffentlichkeitsarbeit

Mehrere wissenschaftliche Mitarbeiter des Instituts sind neben ihrer Forschungsarbeit am MPIA als Hochschullehrer der Universität Heidelberg tätig. Zu den Auf-

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

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

I.2 Wissenschaftliche Fragestellungen

Die zentrale Frage aller kosmologischen und astronomischen Forschung gilt der Entstehung und Entwicklung des Universums als Ganzes sowie der Sterne und Galaxien, der Sonne und ihrer Planeten. An dieser Frage orientiert sich das Forschungsprogramm des MPIA. Im Bereich der galaktischen Forschung konzentriert sich die Arbeit des Instituts auf die Untersuchung der 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 Urganaxien 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 wichtiger Gegenstand der galaktischen Forschung am MPIA ist die Entstehung von Sternen. Die ersten Phasen dieses Vorgangs spielen sich im Inneren dichter Staubscheiben ab und bleiben somit im sichtbaren Licht unseren Blicken verborgen. Die von den Protosternen und ihrer warmen Umgebung abgegebene Infrarotstrahlung vermag jedoch den Staub zu durchdringen, weswegen sich die Frühstadien der Sternentstehung bevorzugt in diesem Wellenlängenbereich studieren lassen.

Der neu geborene Stern ist von einer dichten äquatorialen Staubscheibe umgeben, in der sich die Materie entweder zu weiteren Sternen oder auch zu Planeten verdichten kann. Nach wenigen Millionen Jahren löst sich schließlich die Scheibe auf. So stellen sich die Astronomen auch die Entstehung unseres Sonnensystems vor 4,5 Milliarden Jahren vor. Empirische Evidenz für das tatsächliche Vorhandensein der protoplanetaren Scheiben begann sich in den achtziger Jahren, insbesondere dank zahlreicher Arbeiten am MPIA, verstärkt anzusammeln. Heute stehen am Institut folgende Fragen im Vordergrund: Wie viele der jungen Sterne sind bei ihrer Entstehung von einer Scheibe umgeben und wie lange bleibt sie bestehen? Welche Faktoren entscheiden darüber, ob sich in einer solchen Staubscheibe entweder einer oder mehrere Sterne oder aber Planeten bilden? Sind neben den sonnenähnlichen auch massereichere Sterne von Scheiben umgeben (Kapitel IV.1)?

Unumstritten ist heute auch die Vorstellung, dass sich in den Staubscheiben Planeten bilden können. Seit einigen Jahren lassen sich diese mit einer indirekten Methode nachweisen. In einer Computersimulation gingen Theorie-

tiker der Frage nach, wie sich die neu geborenen Planeten in der Scheibe verhalten. Hierbei stellten sie fest, dass sie unter Umständen innerhalb einer verhältnismäßig kurzen Zeitspanne aus dem Außenbereich der Scheibe an den Zentralstern heranwandern. Dies könnte erklären, warum so viele jupiterähnliche extrasolare Planeten auf sehr engen Umlaufbahnen um ihren jeweiligen Zentralstern beobachtet wurden (Kapitel IV.1).

Dynamik und Entwicklung von Spiralgalaxien, insbesondere der Milchstraße, ist auch seit längerem ein Schwerpunkt der Forschung am Institut. Hier konnte aus Daten des Astrometriesatelliten HIPPARCOS ermittelt werden, dass das Milchstraßensystem eine Balkenspiralgalaxie ist (Kapitel IV.1). Und der vom Calar Alto Deep Imaging Survey (CADIS, s.u.) gelieferte reichhaltige Datensatz – eigentlich zur Suche nach den ersten Galaxien im Universum gedacht – lieferte neue Erkenntnisse über den Aufbau des Milchstraßensystems: Deutlich konnten die drei stellaren Komponenten der »klassischen« Scheibe, der zur Zeit heiß diskutierten »dicken« Scheibe und des Halos identifiziert werden (Kapitel IV.1).

Extragalaktische Forschung

Ein Traum der Kosmologen ist es, bis in die Ära des Universums zurückblicken zu können, in der sich die ersten Galaxien gebildet haben. Diese Urganaxien sind jedoch so weit entfernt, und infolgedessen so lichtschwach, dass sie bislang nicht entdeckt werden konnten. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Astronomen mit empfindlichen Detektoren an die Grenzen der leistungsfähigsten Teleskope gehen und raffinierte Suchstrategien entwickeln. Auf dem Calar Alto läuft am 3,5-Meter-Teleskop seit Mitte der neunziger Jahre das Beobachtungsprogramm CADIS (Calar Alto Deep Imaging Survey), mit dem nach den ersten Galaxien im Universum gesucht wird. Das Programm ist auf mindestens fünf Jahre angelegt und bildet derzeit ein Schlüsselprojekt des MPIA (s. Jahresbericht 1997, S. 18). Während die Suche nach den Urganaxien noch läuft, konnten die CADIS-Daten bereits dazu genutzt werden, die Entwicklung der Galaxien bis zur Rotverschiebung $z = 1$ zu ermitteln (Kapitel II.1).

Ebenfalls ein wichtiges Thema sind die Quasare, die leuchtkräftigsten Objekte im Universum, in deren Zentren man Schwarze Löcher vermutet. Neue mit ISOPHOT gewonnene Daten weisen darauf hin, dass einige Quasare von großen Staubmassen umgeben sind. Allerdings reicht die Aktivität des Schwarzen Loches im Zentrum dieser Quasare in vielen Fällen nicht aus, um die gemessene Ferninfrarotemission zu erklären. Es müssen zudem äußerst aktive Sternentstehungsgebiete vorhanden sein,

wie man sie auch in kollidierenden ultraleuchtkräftigen Galaxiensystemen findet (Kapitel IV.2).

Weniger spektakulär, aber ebenso wichtig für das Verständnis der Galaxienentwicklung, sind Zwerggalaxien. Sie weisen einige Merkmale auf, die sich bislang nicht eindeutig erklären ließen. So ist unklar, warum Zwergsysteme in dichten Galaxienhaufen durchschnittlich weniger Gas enthalten als solche in schwach ausgeprägten Haufen. Eine theoretische Studie belegt jetzt: Innerhalb von wenigen Milliarden Jahren fegt das heiße intergalaktische Medium das interstellare Gas aus den meisten Zwerggalaxien heraus (Kapitel IV.2).

Das Sonnensystem

Das Sonnensystem gehört nicht zu den am Institut vorrangig behandelten Themen. Bei bedeutenden aktuellen Ereignissen innerhalb des Sonnensystems haben die Teleskope auf dem Calar Alto jedoch immer wieder ihre Leistungsfähigkeit unter Beweis stellen können. Im Jahr 1994 gingen die Bilder vom Calar-Alto-Observatorium um die Welt, die den Aufprall von Trümmern des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf Jupiter zeigten. Ein Teil dieser Aufnahmen wurde von der Deutschen Post im ersten holographischen Briefmarkensatz (erschieden 1999) als Motiv ausgewählt (Abb. I.8). 1997 war es der Komet Hale-Bopp, der in der Öffentlichkeit für viel Aufsehen sorgte.

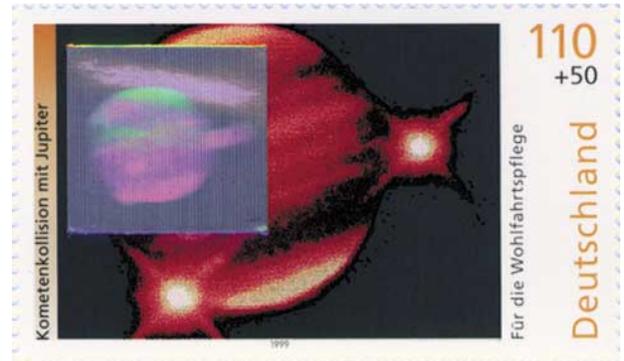


Abb. I.8: Der erste holographische Briefmarkensatz der Deutschen Post zeigt den Aufprall des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf Jupiter im Jahre 1994. Die Bilddaten stammen vom Calar Alto.

Im Berichtsjahr beschäftigte sich die Theoriegruppe mit den Körpern des Kuiper-Gürtels. Die Bahnen dieser Objekte weisen jenseits von 42 Astronomischen Einheiten (AE) ungewöhnlich hohe Exzentrizitäten auf und sind stark gegen die Ekliptik geneigt. Computersimulationen deuten nun eine mögliche Erklärung hierfür an: Ein nur etwa 160 AE entfernter Stern störte die Himmelskörper in der äußeren protoplanetaren Scheibe. Dadurch gerieten sie auf stark exzentrische und geneigte Bahnen, die sie bis heute beibehalten haben (Kapitel IV.3).

II Highlights

II.1 CADIS und die Entwicklung von Galaxien

Galaxien wie unser Milchstraßensystem bilden die Grundbausteine des Universums. Sie enthalten bis zu mehreren hundert Milliarden Sterne und haben Ausdehnungen bis zu einigen hunderttausend Lichtjahren. Die moderne Kosmologie hat auf die brennenden Fragen nach der Entstehung und Entwicklung dieser »Welteninseln« einige überraschende Antworten gefunden. Vieles ist aber noch unklar. Am Institut gelang es im Rahmen des Forschungsprojekts CADIS, die Entwicklung unterschiedlicher Galaxientypen während der letzten knapp zehn Milliarden Jahre zu untersuchen. Erstmals für diese Studie konnte eine statistisch signifikante Zahl von Galaxien herangezogen werden.

In den ersten Modellen der kosmischen Evolution ging man davon aus, dass sich innerhalb der ersten Milliarde Jahre nach dem Urknall einzelne Gaswolken mit den Massen der heutigen Galaxien durch die Schwerkraftwirkung zusammenzogen und sich anschließend als weitgehend isolierte Systeme zu den heutigen Galaxien entwickelten. Beobachtungen aus jüngerer Zeit haben jedoch gezeigt, dass dieses einfache Bild stark revidiert werden muss. So darf man die Wechselwirkung der jungen Galaxien, die im frühen und damit dichteren Universum wesentlich näher beisammen waren als heute, keinesfalls außer acht lassen.

Im so genannten Hubble Deep Field, einem ausgewählten Himmelsgebiet, von dem 1995 mit dem Weltraumteleskop Hubble eine zehn Tage lang belichtete Aufnahme in mehreren Filtern gewonnen wurde, entdeckte man eine mit der Rotverschiebung stark anwachsende Zahl von blauen, irregulären Galaxien, deren Durchmesser nur etwa zehntausend Lichtjahre betragen. Im heutigen Universum ist ihr Anteil an allen Galaxien wesentlich geringer. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass diese kleinen Systeme später zu größeren Galaxien verschmolzen sind.

Neben morphologischen Studien eignet sich vor allem die so genannte Leuchtkraftfunktion der Galaxien als aussagekräftiges Mittel, um Eigenschaften von Galaxienverteilungen zu beschreiben. Sie gibt die Häufigkeit von Galaxien verschiedener absoluter Leuchtkraft in einem gegebenen Volumen an. Die Leuchtkraftfunktion für unterschiedliche Rotverschiebungen (Entfernungen) beschreibt demnach die Entwicklung von Galaxienpopulationen mit dem Alter des Universums.

3000 Galaxien zur Bestimmung von Leuchtkraftfunktionen

Die Ermittlung der Leuchtkraftfunktion stößt beobachtungstechnisch auf erhebliche Schwierigkeiten. Ziel ist es, möglichst viele Galaxien bis zu möglichst geringen Helligkeiten hinab zu erfassen und deren Rotverschiebungen zu bestimmen. In den 90er Jahren gab es einige Versuche, die auf Direktaufnahmen und anschließender Spektroskopie der Objekte basierten. Hierbei treten jedoch Auswahl-effekte auf, die sich nur schwer korrigieren lassen. Außerdem dringt man mit spektroskopischen Beobachtungen nicht zu so schwachen Objekten vor wie mit Direktaufnahmen.

Astronomen des MPIA gingen nun einen anderen Weg. Sie nutzten den einmaligen Datensatz des Calar Alto Deep Imaging Survey, CADIS. Dies ist ein langfristig angelegtes Programm zur Suche nach den Uralgalaxien im Universum (s. Kapitel IV.1). Im Rahmen dieses Projekts werden mehrere Himmelsfelder mit einer Fläche von jeweils 100 bis 150 Quadratbogenminuten (entsprechend einem Viertel der Vollmondfläche) durch eine Vielzahl von Farbfiltern aufgenommen. Hierfür stehen am Calar-Alto-Observatorium das 2.2-Meter- und das 3.5-Meter-Teleskop zur Verfügung.

Die CADIS-Aufnahmen weisen neben dem großen Bildfeld zwei weitere entscheidende Vorteile auf: Zum einen werden photometrische Aufnahmen durch eine Vielzahl von Filtern erstellt, so dass sich daraus schon sehr genau die spektrale Energieverteilung ermitteln lässt. Zum anderen werden wegen der langen Belichtungszeiten von mehreren Stunden auch sehr lichtschwache Objekte bis zur 23. Größe sichtbar.

Für die Bestimmung der Leuchtkraftfunktionen von Galaxien wurden die Aufnahmen der drei Felder um 1^h, 9^h und 16^h Rektaszension verwendet. Die Belichtungszeiten betragen bei den Schmalbandfiltern typischerweise 5.5 Stunden. Da die Himmelsfelder bei hohen galaktischen Breiten liegen, ist Extinktion durch interstellaren Staub vernachlässigbar.

Zur Trennung der Galaxien von den Sternen und Quasaren wurde eine spezielle Software geschrieben. Die Trennung erfolgt nicht auf Grund der Form, sondern ausschließlich auf Grund der Farben. Hierfür wurde ein Spektralatlas verwendet, der die spektralen Energieverteilungen von Sternen, Quasaren und hundert unterschiedlichen Galaxientypen, von alten elliptischen Galaxien bis zu jun-

gen Populationen mit hoher Sternentstehungsrate (Starburst-Galaxien), enthält. Diese Energieverteilungen wurden im Computer sukzessive zu größeren Wellenlängen rotverschoben und anschließend wurde ermittelt, welche Farben diese Objekte in den bei CADIS verwendeten Filtern haben würden. Auf diese Weise entstanden 132 spektrale Energieverteilungen für Sterne, 45 000 für Quasare und 20 000 für Galaxien bis zu einer maximalen Rotverschiebung von $z = 1$. Mit diesem Klassifizierungsverfahren ließen sich in den drei Feldern bis zur 23. Größe 939 Sterne, 71 Quasare und 2779 Galaxien identifizieren. Mit Monte-Carlo-Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Genauigkeit der Rotverschiebungswerte ± 0.04 beträgt, woraus sich für die absolute Helligkeit eine ausreichende Genauigkeit von 0.2 mag ergibt.

Mit dieser Methode findet man mehr Galaxien und dringt zu schwächeren Objekten vor als es mit spektroskopischen Beobachtungen möglich war. Das Ergebnis ist die bislang umfangreichste Galaxiengruppe bis zu 22 mag scheinbarer Helligkeit, die frei von Auswahleffekten ist. Hiermit ist es erstmals möglich, statistisch gesicherte Aussagen über die Leuchtkraftfunktion bei verschiedenen Werten der Rotverschiebung zu treffen. Lediglich für die nahen Galaxien ($z < 0.2$) ließ sich keine Leuchtkraftfunktion erstellen, weil sich in dem CADIS-Bildfeld zu wenig nahe Galaxien befinden. Die CADIS-Daten eignen sich demnach für die Leuchtkraftfunktion von Galaxien für Rotverschiebungswerte im Bereich zwischen $z = 0.2$ und $z = 1$.

Dabei spielt das angenommene Weltmodell eine wesentliche Rolle. Da das Universum expandiert, dehnt sich ein zu einer bestimmten Rotverschiebung gegebenes Volumenelement aus. Will man die Galaxiendichte zu einem frühen Zeitpunkt im Universum mit derjenigen zu einem späteren vergleichen, so muss man diese Volumenvergrößerung berücksichtigen. Sie ist aber abhängig vom gewählten kosmologischen Modell. In der Studie des MPIA wurde ein Universum mit der kritischen Dichte ($\Omega = 1$) und einer Hubble-Konstante $H_0 = 100 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$ gewählt.

Hat sich die Leuchtkraftfunktion zeitlich entwickelt?

Mitte der siebziger Jahre fand der amerikanische Astronom Paul Schechter eine Funktion, mit der sich die Leuchtkraftverteilung der nahen Galaxien beschreiben lässt. Demnach sinkt die Galaxiendichte generell mit wachsender Leuchtkraft, das heißt, es gibt mehr lichtschwache Galaxien als helle. Eine solche Schechter-Funktion lässt sich in zwei Bereiche teilen: Oberhalb einer charakteristischen Leuchtkraft L^* fällt die Verteilung exponentiell ab, unterhalb davon ($L < L^*$) fällt sie gemäß einem Potenzgesetz. Für nahe Galaxien liegt die charakteristische Leuchtkraft etwas oberhalb von $L^* = 10^{10}$ Sonnenleuchtkräften, was ziemlich genau dem Wert für die Milchstraße entspricht. Häufig werden die Leuchtkräfte der Galaxien auch in deren absolute Helligkeiten umge-

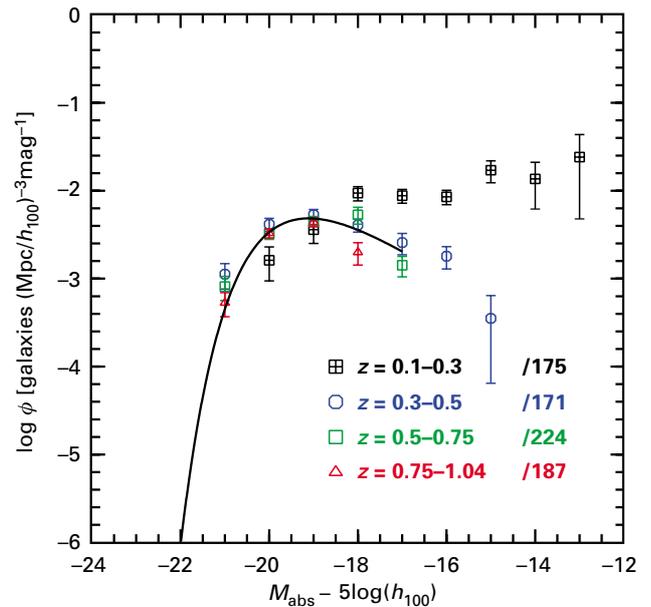


Abb. II.1: Die Leuchtkraftfunktion für Galaxien des frühen Typs zeigt in den vier angegebenen Rotverschiebungsbereichen keine signifikante Entwicklung.

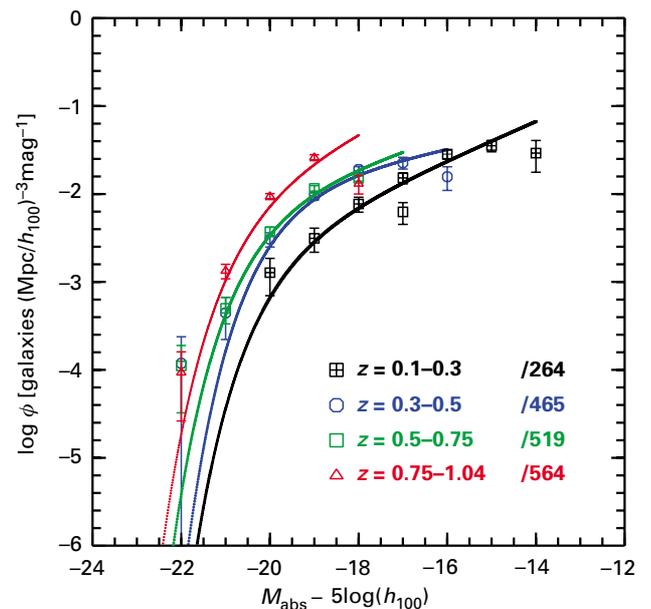


Abb. II.2: Die Leuchtkraftfunktion für Galaxien des späten Typs entwickelt sich mit der Rotverschiebung.

rechnet. Bei nahen Galaxien liegt die charakteristische absolute Helligkeit im Blauen bei etwa $B^* = -20$ mag.

Die bisherigen Untersuchungen brachten keine eindeutige Antwort auf die Frage, ob sich die Leuchtkraftfunktion zeitlich verändert hat. Die CADIS-Daten enthielten nun so viele Galaxien, dass die Verteilung für die vier Rotverschiebungsbereiche von 0.1 bis 0.3, 0.3 bis 0.5, 0.5 bis 0.75 und 0.75 bis 1 aufgestellt werden konnte. Dabei wurde zudem unterschieden zwischen so genannten Galaxien des frühen Typs (elliptische und Spiralgalaxien mit Hubb-

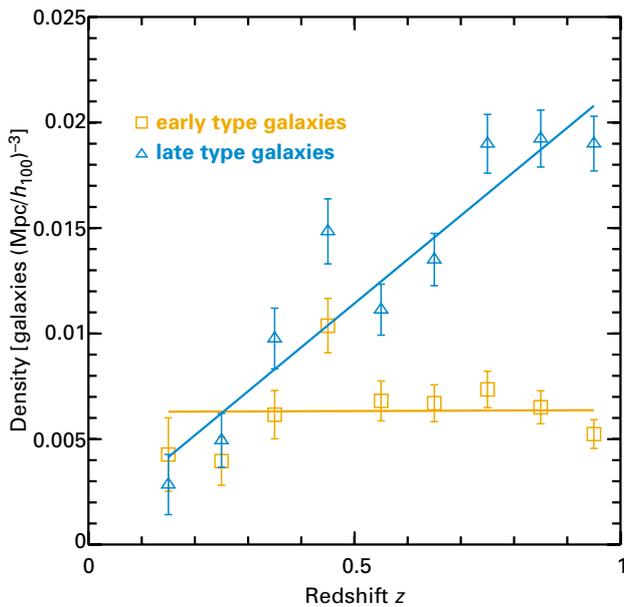


Abb. II.3: Die Raumdichte der frühen und späten Galaxien in Abhängigkeit von der Rotverschiebung. Mit wachsendem Alter des Universums hat sich die Dichte der späten Typen verringert, während diejenige der frühen Typen konstant geblieben ist.

le-Typ früher als Sb) und des späten Typs, die von Starburst-Galaxien dominiert werden.

Zunächst einmal findet sich für frühe Galaxien keine Abhängigkeit der Leuchtkraftfunktion von der Rotverschiebung (Abb. II.1). Das heißt, es gab im frühen Universum genau so viele elliptische und Spiralgalaxien wie heute. Die charakteristische absolute Helligkeit im Blauen liegt bei -19.9 mag und bleibt, ebenso wie der Kurvenverlauf der Leuchtkraftfunktion, unverändert.

Anders bei den Galaxien des späten Typs (Starburst-Galaxien) (Abb. II.2). Hier zeigen die Kurven unterschiedliche Steigungen, die charakteristische Helligkeit nimmt mit wachsender Rotverschiebung zu, und die Kurven verschieben sich mit wachsender Rotverschiebung zu höheren Werten. Das heißt, vor etwa rund zehn Milliarden Jahren gab es im Universum rund fünfmal mehr Starburst-Galaxien, und die Galaxien waren früher typischerweise leuchtkräftiger als heute.

Wie sich die Dichten der unterschiedlichen Galaxientypen mit zunehmendem Alter des Universums entwickelt haben, zeigt Abb. II.3. Hier ist klar erkennbar, dass die räumliche Dichte (gegeben als Anzahl pro Million Kubikmegaparsec) bei den frühen Typen etwa konstant geblieben ist, während sich die Dichte der späten Typen mit steigendem Weltalter verringert hat. Hierbei wurde die Expansion des Universums berücksichtigt.

Die Interpretation der neuen Daten ist nicht ganz eindeutig. Unter Hinzunahme der Ergebnissen anderer Arbeiten zeichnet sich aber ein interessantes Szenario der kosmischen Entwicklung ab. So ist schon seit längerem klar, dass es sich bei Starburst-Galaxien zum Großteil um Systeme handelt, in denen je zwei Galaxien verschmelzen. Durch diesen Vorgang wird das interstellare Gas verwirbelt, und es setzt starke Sternentstehung ein. Die meisten Starburst-Galaxien aus der CADIS-Gruppe würden daher sehr wahrscheinlich als irreguläre Systeme erscheinen. Nun deuten jüngere Studien an, dass es im frühen Universum mehr verschmelzende, irreguläre Galaxien gab als heute. Die CADIS-Studie bestätigt dies erstmals an Hand einer statistisch signifikanten Gruppe. Darüber hinaus liefert sie absolute Zahlen, die als Basis für kosmologische Entwicklungsmodelle dienen können.

II.2 Astrophysik mit Gravitationslinsen

Gravitationslinsen erlangen in der modernen Astrophysik eine ständig wachsende Bedeutung. Obwohl schon in den 30er Jahren vorausgesagt, wurde erst 1979 die erste Gravitationslinse entdeckt. Seitdem hat sich dieser Bereich der astronomischen Forschung rasant entwickelt. In Zusammenarbeit mit dem Center for Astrophysics in Boston und der University of Arizona in Tucson sind Forscher des Instituts derzeit an einem breit angelegten Programm beteiligt, bei dem mit dem Weltraumteleskop Hubble eine große Zahl von Gravitationslinsen beobachtet werden. Im Rahmen dieses CASTLES genannten Projekts ließen sich in vielen Systemen mit Mehrfachbildern der selben Hintergrundquelle bislang unauffindbare Galaxien nachweisen, die als Linsen wirken. Darüber hinaus erlaubt dieser einzigartige Datensatz eine unabhängige Bestimmung der Hubble-Konstante.

Der Gravitationslinseneffekt beruht auf dem von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Effekt, wonach Materie das sie umgebende Raumzeitvolumen krümmt (Abb. II.4). Licht eines entfernten Objektes, das auf dem Weg zur Erde ein so gekrümmtes Raumzeitvolumen durchläuft, wird von seiner geradlinigen Bewegungsrichtung abgelenkt. Der Ablenkwinkel ist proportional zur wirkenden Masse.

Solche gekrümmten Raumzeitgebiete wirken wie Linsen. Je nach Geometrie erscheint das entferntere Objekt dem Beobachter aufgrund dieses Effekts entweder als Mehrfachbild oder als Ring. Letzteres ist dann der Fall, wenn Hinter- und Vordergrundobjekt genau auf derselben Sichtlinie des Beobachters liegen. Man spricht dann von einem Einstein-Ring. Darüber hinaus verstärkt der Gravitationslinseneffekt die Intensität eines der erzeugten Bil-

der. Ein »gelinstes« Objekt erscheint dann heller als es ohne diesen Effekt der Fall wäre.

Der Gravitationslinseneffekt wurde erstmals bereits während der Sonnenfinsternis am 29. März 1919 nachgewiesen. Damals waren zwei Expedition unter der Leitung von Sir Arthur Eddington nach Südamerika aufgebrochen, um dieses Phänomen zu beobachten. Einstein hatte nämlich zuvor die Lichtablenkung im Schwerfeld der Sonne berechnet und einen doppelt so großen Wert vorausgesagt wie die Newtonsche Theorie. Demnach sollten die Positionen von Sternen unmittelbar am Sonnenrand um fast zwei Bogensekunden gegenüber ihren normalen Positionen verschoben sein. Tatsächlich konnten die Astronomen Einsteins Vorhersage bestätigen, was den Durchbruch für die Allgemeine Relativitätstheorie bedeutete.

Der in die USA ausgewanderte Schweizer Astronom Fritz Zwicky sagte dann 1937 voraus, dass Galaxien weiter entfernte Sternsysteme mehrfach oder zu Ringen verzerrt abbilden sollten. Gleichzeitig deutete Zwicky bereits einige kosmologische Anwendungen des Gravitationslinseneffekts an. Bis zur Entdeckung der ersten Gravitationslinse sollte es jedoch noch vier Jahrzehnte dauern.

1979 wurden zwei nur sechs Bogensekunden voneinander getrennte Quasare mit nahezu identischen Spektren entdeckt: Sofort kam der Verdacht auf, dass es sich tatsächlich um zwei Bilder eines einzigen Quasars handeln müsse. Als man wenig später zwischen den beiden Quasarbildern eine nahe Galaxie fand, war man davon überzeugt,

Abb. II.4: Prinzip des Gravitationslinseneffekts. Das Schwerfeld eines Galaxienhaufens oder auch einer einzigen Galaxie beugt das Licht eines entfernten Quasars und erzeugt zwei oder mehrere Bilder. Stehen Linse und Quelle unmittelbar hintereinander, so wird die Quelle zum Einstein-Ring verformt.

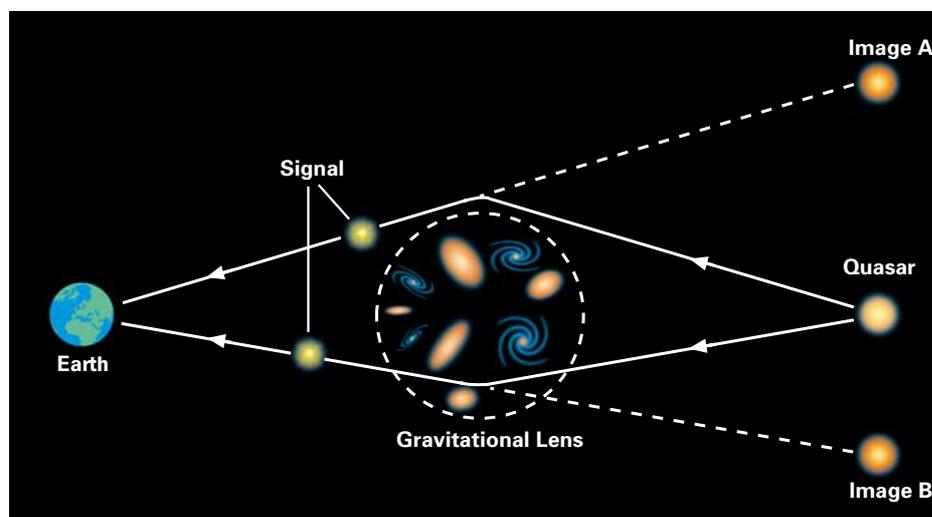




Abb. II.5: In dem Galaxienhaufen CL0024+1654 wird eine Hintergrundgalaxie siebenmal abgebildet (blau). (Bild: NASA/ESA)

dass sie die Linse sein müsse. In den 80er Jahren fand man dann auch bogenförmig verzerrte Bilder weit entfernter Galaxien. Hier wirkte das Gravitationspotential eines ganzen Galaxienhaufens als Linse (Abb. II.5).

Das CASTLES-Projekt

Bis Ende 1999 waren über 50 Gravitationslinsensysteme bekannt, bei denen eine einzelne Galaxie als Linse wirkt, die von hinter ihr liegenden Quasaren und Radioquellen Mehrfachbilder erzeugt. Fast alle Linsen sind massereiche elliptische Galaxien. Sie stellen insofern eine besondere Gruppe dar, als sie nicht wie üblich auf Grund ihrer Leuchtkräfte, sondern ihrer Massen ausgewählt sind. Mit CASTLES (CfA-Arizona-Space-Telescope-Lens-Survey, cfa-www.harvard.edu/castles) verfolgen die Astronomen folgende Ziele:

- Auffinden noch unentdeckter Linsengalaxien
- exakte Positionsmessung der Bilder und der Linse

- photometrische Bestimmung der Rotverschiebung der Linse
- Nachweis von gelinsten Galaxien (host galaxies) um aktive galaktische Kerne
- Bestimmung von Struktur und Entwicklung der als Linse wirkenden Galaxien
- Messung der Extinktion in den als Linse wirkenden Galaxien
- Nachweis der Dunklen Materie
- Bestimmung der Hubble-Konstante

Diese Liste unterstreicht die weitreichenden Möglichkeiten, die der Gravitationslinseneffekt bietet.

Zwar gibt es von vielen der mit CASTLES untersuchten Systeme bereits Beobachtungsdaten. Das vorhandene Material ist jedoch von unterschiedlicher Qualität, und die Aufnahmen wurden in sehr vielen unterschiedlichen Filterbereichen gemacht, so dass vergleichende Studien kaum möglich sind. Seit 1997 werden die 54 bekannten Systeme mit dem HST beobachtet. Verwendet werden die Wide Field Planetary Camera 2 im visuellen (V, bei 555 nm Wellenlänge), im Roten (R, 675 nm) und im nahen Infrarot (I, 814 nm) sowie die NICMOS-Kamera im Infrarot (H, 1600 nm). Bis Ende 1999 waren von allen geplanten Aufnahmen 60 % in V, 70 % in I und 80 % in H erstellt.

Kritischer Punkt: die Modelle

Die Entdeckung und Charakterisierung der Linsen in allen Systemen ist zwar das primäre Ziel von CASTLES. Ihm muss jedoch eine intensive Untersuchung und theoretische Interpretation der Daten folgen. Grundvoraussetzung hierfür ist ein theoretisches Modell, welches das Schwerkräftfeld der Linse wiedergibt. Hierbei müssen insbesondere folgende Punkte berücksichtigt werden: Zunächst muss die relative Zentralposition der Linsengalaxie möglichst genau bestimmt werden. Auf den HST-Aufnahmen ist dies bis auf einige hundertstel Bogensekunden möglich. Dann muss ein Massenprofil der Linsengalaxie erstellt werden, das die Masse innerhalb des Einstein-Ringradius sowie die Elliptizität und Orientierung der Galaxie beschreibt. Hier haben sich je nach Galaxientyp drei Modelle als am realistischsten erwiesen: die isotherme ellipsoidförmige Sphäre, das De-Vaucouleurs-Modell und eine Scheibe mit exponentiellem Dichteaufbau.

Darüber hinaus muss die Lichtablenkung durch benachbarte Galaxien berücksichtigt werden. Und schließlich können auch durch großräumige Strukturen erzeugte Gravitationsfelder wirken, die sich bei beliebigen Rotverschiebungen auf dem Sehstrahl zum gelinsten Objekt befinden können. Letztere sind nicht direkt auf den Aufnahmen erkennbar und daher besonders schwierig zu berücksichtigen.

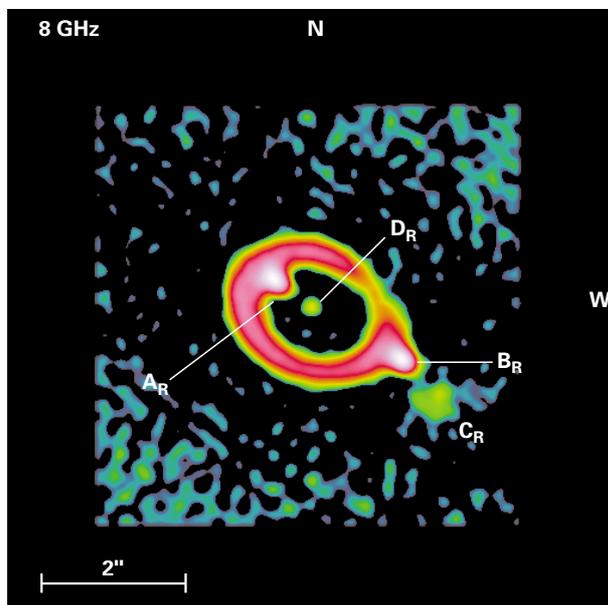
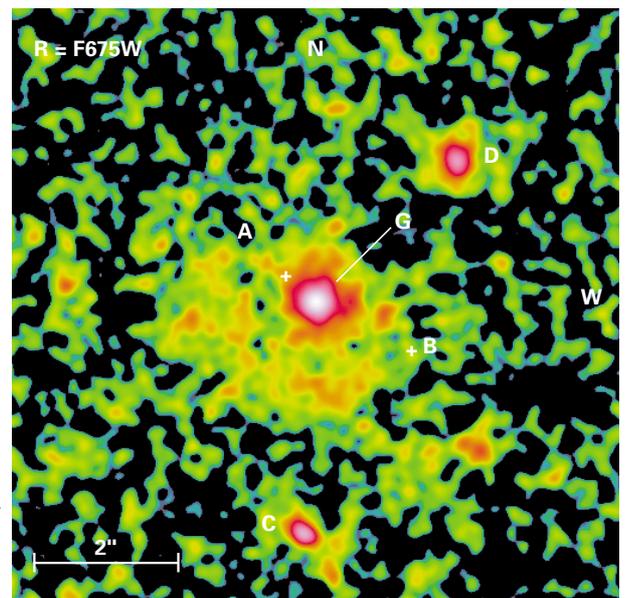
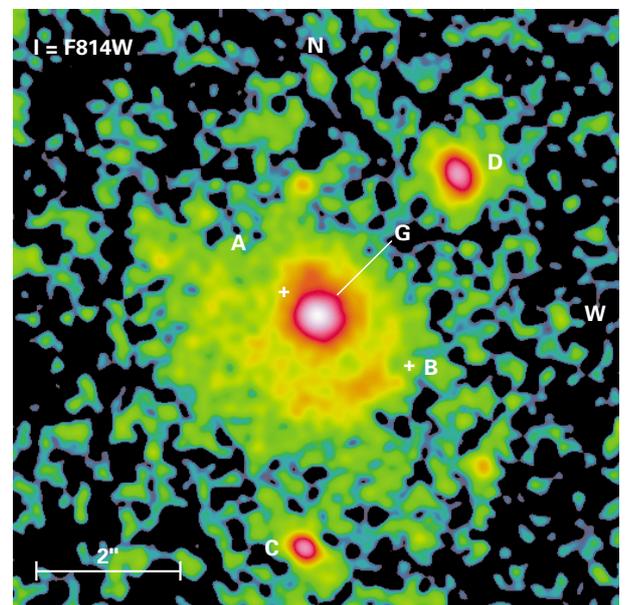
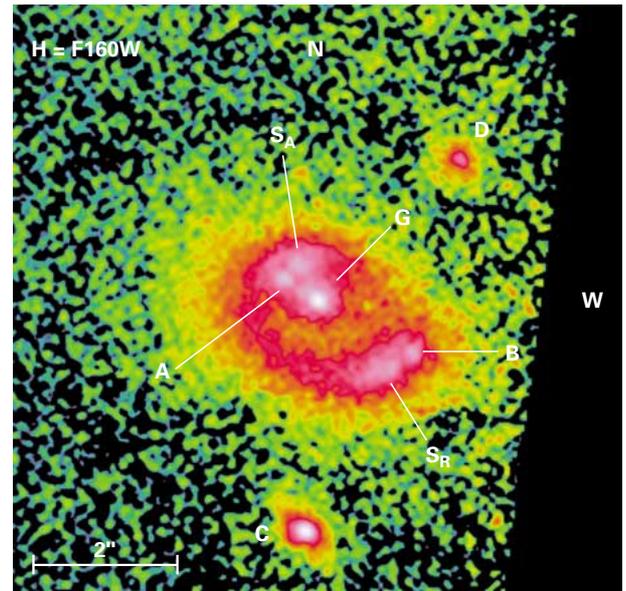
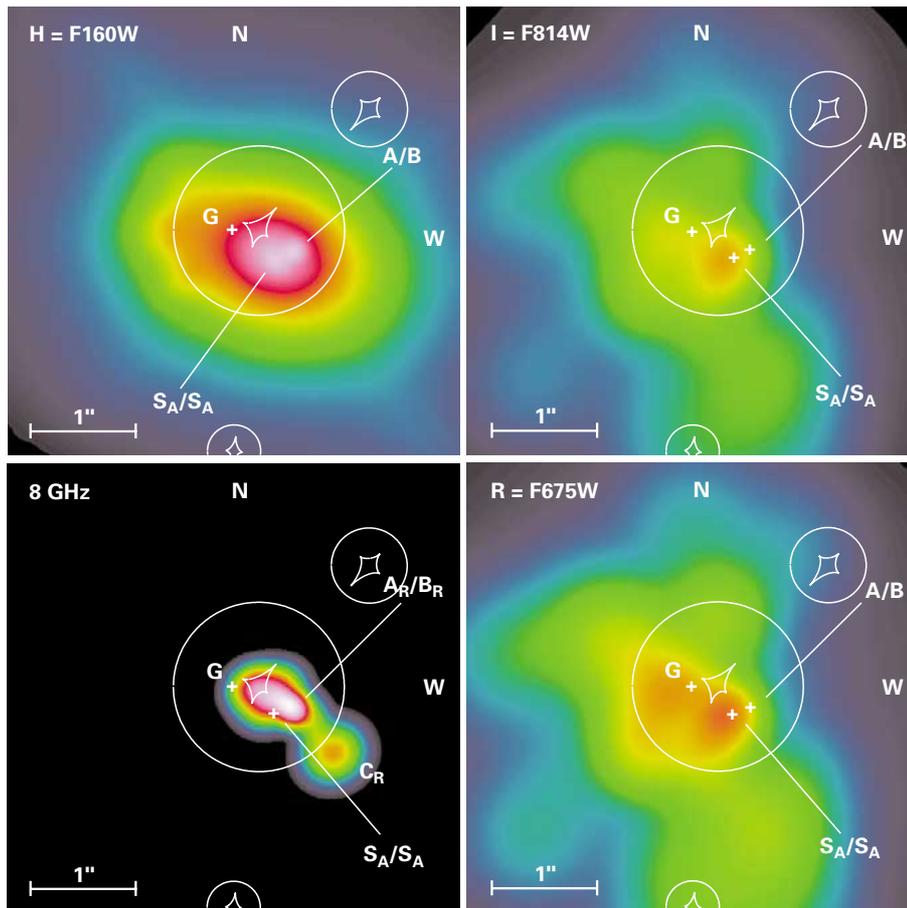


Abb. II.6: Im Radiobereich zeigt sich der Einstein-Ring MG 1131+0456 mit den beiden hellen Knoten und der zentralen Linsengalaxie (D_R). Die Bilder des aktiven galaktischen Kerns sind mit A_R und B_R gekennzeichnet.

Abb. II.7: Die im Rahmen von CASTLES gewonnenen Aufnahmen von MG 1131+0456 in den Filterbereichen H, I und R des HST. Die Bilder des aktiven galaktischen Kerns sind mit A und B, die Linsengalaxie mit G gekennzeichnet.





Der Einstein-Ring MG 1131+0456

MG 1131+0456 ist der als erster entdeckte Einstein-Ring. Im Jahre 1988 fand man ihn bei Radiobeobachtungen. Bei einer Frequenz von 8 GHz zeigt sich ein elliptischer Ring mit etwa zwei Bogensekunden Durchmesser, auf dem sich an gegenüberliegenden Stellen zwei helle Knoten befinden (in Abb. II.6 mit A_R und B_R bezeichnet). Bei nachfolgenden Beobachtungen stellte man fest, dass die Strahlung dieser Knoten in ihrer Intensität variiert. Außerdem erscheint im Zentrum des Rings eine schwache Punktquelle (D_R).

Die Natur dieser unterschiedlichen Komponenten im Gravitationslinsenbild blieb jahrelang umstritten. Heute ist man sicher, dass das zentrale Objekt die Linsengalaxie ist, während es sich bei der gelinsten Hintergrundquelle um eine aktive Galaxie handelt, aus deren Zentralgebiet ein Jet herauschießt. Der Einstein-Ring ist das Bild des Jets, und die beiden Knoten A_R und B_R sind zwei Bilder des punktförmigen aktiven galaktischen Kerns. Ein schwach leuchtendes Wölkchen nahe dem Radioknoten B_R wird als ungelinsten Teil des Jets gedeutet. Die Modellierung des Systems erwies sich als sehr schwierig.

Im Rahmen des CASTLES-Projekts gelang es, im Optischen und im nahen Infrarot von MG 1131+0456 Aufnah-

Abb. II.8: Rekonstruktion der gelinsten Quelle in den drei Filterbereichen des HST und im Radiobereich (8 GHz). Im Radiobild erkennt man deutlich den Jet und in den anderen Bildern die optische Emission, die teilweise mit dem Jet assoziiert zu sein scheint. Der mutmaßliche aktive Kern ist nicht erkennbar, vermutlich, weil er von Staub verdeckt wird.

men hoher Qualität zu erhalten (Abb. II.7). Auf allen Bildern erscheint die Linsengalaxie. Im nahen Infrarot (H-Aufnahme) sieht man neben der Linse auch das Licht der Sterne in der fernen Galaxie zu einem spektakulären Einstein-Ring verzerrt. Die Intensitätsverteilung der Linsengalaxie ließ sich sehr gut durch ein De-Vaucouleurs-Profil mit einem effektiven Radius von 0.68 Bogensekunden beschreiben, und die Farben passen zu einer elliptischen oder S0-Galaxie in einem Rotverschiebungsbereich zwischen $z = 0.8$ und $z = 1.0$. Schätzungen anderer Astronomen hatten auf Rotverschiebungen von 0.85 bzw. 0.89 geführt. Dies stärkt das Vertrauen in die angewandte Ermittlung der Rotverschiebung auf dem Wege der Mehrfarbenphotometrie.

Weitere Galaxien befinden sich in der gleichen Entfernung wie die Linse und gehören sehr wahrscheinlich alle zu einem Haufen. Sie tragen zur Bildverzerrung bei und müssen deshalb im Modell berücksichtigt werden.

Mit diesen Daten konnte für den gesamten Galaxienhaufen einschließlich der Linsengalaxie ein Massenmodell erstellt werden. Damit ließ sich nun das verzerrte Bild von MG 1131+0456 entzerren und das Bild der Quelle rekonstruieren (Abb. II.8). Nun erkennt man im Radiobild deutlich die längliche Jet-Struktur. Die entzernte Emission im nahen Infrarot erscheint jetzt als eine elliptische Verteilung mit einem hellen Zentrum: Man hat hier also plötzlich ein »normales« Galaxienbild vor sich. Bei noch kürzeren Wellenlängen um 600 nm (V-Aufnahme) erscheint eine Hälfte der rekonstruierten Quelle viel schwächer. Diese asymmetrische Struktur und die Farbe der Quelle deuten auf größere Staubmengen hin.

Ein Teil der optischen Emission kommt überdies aus einem Bereich entlang des Jets – ein Phänomen, das man bislang nur bei ganz wenigen extragalaktischen Jets gefunden hat. Wie auch andere Arbeiten gezeigt haben, liegt die Hintergrundquelle bei einer Rotverschiebung von etwa $z = 2$, so dass die Jet-Galaxie die beobachtete Strahlung im UV emittiert hat. Hierbei könnte es sich um Streulicht aus dem Kernbereich handeln, sie könnte aber auch im interstellaren Medium der Galaxie entstanden sein, in dem der Jet Schocks auslöst. Es wäre auch denkbar, dass Staub den aktiven Kern abschattet. Das würde erklären, warum er nur im Radiobereich und im nahen IR erkennbar ist.

MG 1131+0456 ist ein gutes Beispiel, wie sich aus einem hochkarätigen Datensatz eine Fülle von Informationen über die gelinsten Himmelskörper bei hohen Rotverschiebungen in Erfahrung bringen lassen.

Die Hubble-Konstante

Schon vor der ersten Entdeckung einer Gravitationslinse befassten sich Theoretiker mit der Frage, wie sich dieser Effekt nutzen ließe, um die Hubble-Konstante zu bestimmen. In den 60er Jahren fand Sjur Refsdal an der Sternwarte Hamburg-Bergedorf für dieses Problem folgende prinzipielle Lösung: Erzeugt beispielsweise eine Galaxie zwei Bilder eines Quasars, so laufen die beiden Lichtbündel auf unterschiedlichen Wegen von der Quelle zum Beobachter (Abb. II.4). Diese beiden Lichtwege sind dann im Allgemeinen unterschiedlich lang und werden vom Licht der Quelle in unterschiedlichen Zeiten durchlaufen. Zudem erfährt das Licht eine relativistische Verzögerung, da es durch unterschiedliche Bereiche des Gravitationsfeldes läuft. Das heißt, ein vom Quasar emittiertes Signal erreicht den Beobachter auf den beiden Wegen zu unterschiedlichen Zeiten. Genau gesagt hat das Licht jenes Bildes, das dem Zentrum der Linse am nächsten erscheint, die längste Laufzeit.

Ziel ist es nun, ein Computermodell zu konstruieren, in dem die Massenverteilung der Linsengalaxie so lange variiert wird, bis sie die beobachteten astronomischen Größen, wie Winkelabstände und Helligkeitsverhältnisse zwischen den Bildern sowie die Helligkeit der Lin-

sengalaxie richtig wiedergibt. Sind die Rotverschiebungen der Linsengalaxie und des Quasars bekannt, so kann man aus der Laufzeitdifferenz die Gesamtlaufzeit der Signale berechnen. Das ergibt dann die tatsächliche Entfernung zu einer bestimmten Rotverschiebung und damit auch die Hubble-Konstante, die die Proportionalitätskonstante zwischen Rotverschiebung und Entfernung ist.

Dieses im Prinzip recht einfache Verfahren zur Bestimmung der Hubble-Konstante ist als einziges rein geometrischer Natur. Letztlich hängt der Wert noch zu 5 bis 10 % vom gewählten kosmologischen Modell ab. In der Praxis erweist sich die Gravitationslinsenmethode indes als sehr schwierig. Zum einen sind die Laufzeitdifferenzen schwer messbar und bislang erst bei vier Systemen bekannt, und zum anderen müssen die Massenmodelle sehr genau sein, wenn man die Hubble-Konstante bis auf weniger als 10 % bestimmen will.

Insbesondere tritt in Fällen, in denen lediglich zwei oder mehr Bilder eines Quasars erkennbar sind, das Problem der Mehrdeutigkeit auf. Das heißt, es gibt mehrere Massenmodelle, die das beobachtete Linsenbild gleich gut wiedergeben. Hier können zusätzliche Einstein-Ringe oder verzerrte Bilder der »Muttergalaxie«, in der sich der Quasar befindet, weiterhelfen. Wirklich detailliert – aber auch nicht wirklich eindeutig – ließ sich die Hubble-Konstante erst in zwei Fällen ansatzweise bestimmen: bei PG 1115+080 und Q 0957+561.

PG 1115+080 ist das zweite bekannte »gelinste« Objekt. Es besteht aus vier Quasarbildern (Abb. II.9). Die Quelle ist ein Quasar bei der Rotverschiebung $z = 1.722$, die Linse ist eine elliptische Galaxie bei $z = 0.31$. Zwischen den Bildern B und C konnte eine Zeitverzögerung von 25 Tagen gemessen werden. Außerdem ist das Verhältnis der Zeitverzögerungen zwischen A und C sowie A und B bekannt. Frühere Untersuchungen hatten auf eine Hubble-Konstante von $53 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$ geführt.

Neue Aufnahmen, insbesondere im nahen Infrarot (H-Filter), die im Rahmen von CASTLES gewonnen wurden, lieferten jetzt strengere Randbedingungen für das Massenmodell der Linsengalaxie. Erstmals war es möglich, die Linsengalaxie räumlich aufzulösen und damit auch bessere Modelle für sie zu erstellen. Sie wurde mit einem DeVaucouleurs-Helligkeitsprofil dargestellt, woraus sich ein effektiver Radius von 0.6 Bogensekunden ergab. Aus der nahezu kreisrunden Form schlossen die Astronomen, dass es sich um eine normale elliptische Galaxie handelt, die keine nennenswerten Staubanteile enthält. Auch dies ist für die Interpretation der Helligkeitsverhältnisse der Bilder eine wichtige Information. Denn zwei Lichtbündel, die durch unterschiedliche Gebiete einer staubreichen Galaxie gelaufen sind, können durch den Staub in unterschiedlichem Maße geschwächt sein.

Nachdem die Bilder der Linsengalaxie und des Quasars mit Intensitätsfunktionen gefittet waren, konnten sie von der Nahinfrarot-Aufnahme abgezogen werden. Anschließend zeigte sich deutlich ein Einstein-Ring. Bei ihm han-

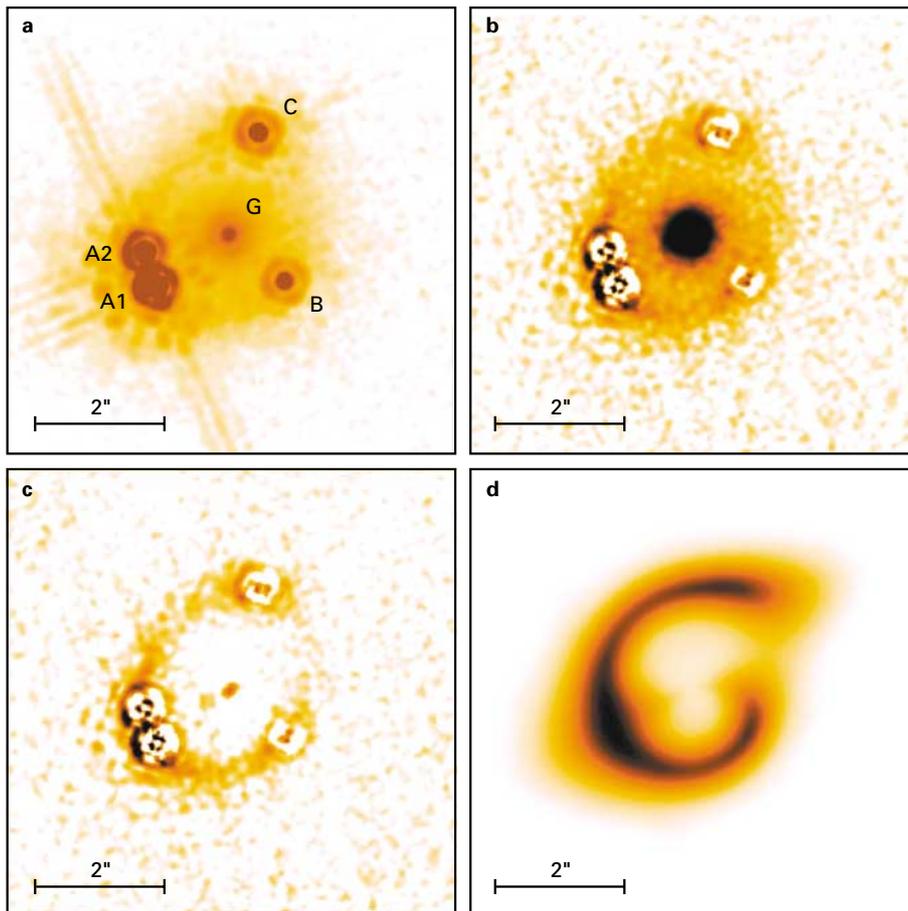


Abb. 11.9: HST-Aufnahme von PG 1115+080 im nahen Infrarot. (a) H-Aufnahme im Original. Nach Abzug der Quasarbilder (b) und der Linsengalaxie (c) wird der Einstein-Ring erkennbar; (d) zeigt den mit dem Massenmodell berechneten Ring.

delt es sich um das verzerrte Bild der Muttergalaxie des Quasars. Dieser Ring liefert eine weitere Randbedingung für das Massenmodell der Linsengalaxie. Überdies mussten die Gravitationsfelder von neun weiteren Galaxien, die sich im Aufnahmegebiet befinden, berücksichtigt werden. Sie erzeugen die oben erwähnten Gezeitenkräfte auf das Gravitationsfeld der Linsengalaxie.

Trotz des wesentlich verbesserten Datenmaterials ließ sich die Hubble-Konstante nicht eindeutig ermitteln. Der wesentliche Grund ist die Mehrdeutigkeit des Massenmodells der Linsengalaxie. Beschreibt man diese durch ein isothermes Ellipsoid, so ergibt sich ein Wert von $H_0 = 44 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$. Wählt man ein Modell mit einem konstanten Masse-zu-Leuchtkraft-Verhältnis, so erhält man $H_0 = 65 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$. Beide Werte gelten für ein Weltmodell mit kritischer Dichte ($\Omega = 1$). Sie erhöhen sich um etwa 10 %, wenn man ein offenes Universum mit $\Omega = 0.1$ annimmt. Die Unsicherheit lässt sich zukünftig noch verringern, indem man die Laufzeitdifferenz genauer misst und tiefere Aufnahmen erstellt, so dass der Einstein-Ring besser defi-

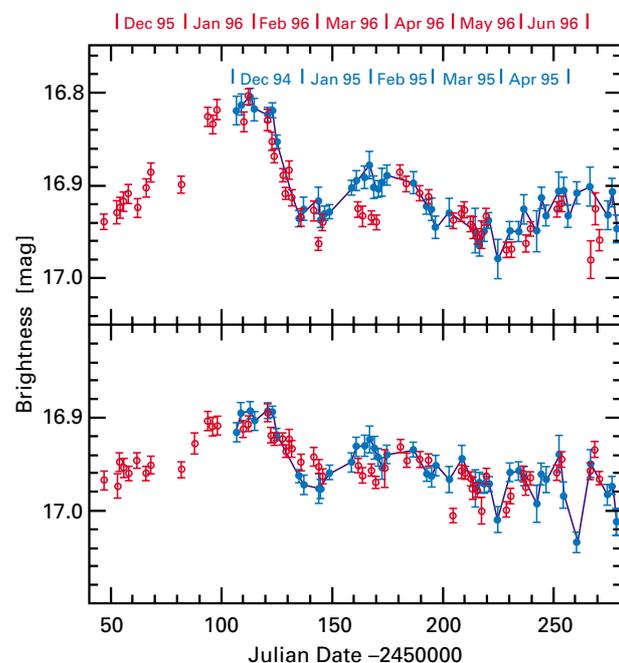


Abb. 11.10: Helligkeitsverlauf der beiden Bilder im Doppelquasar Q0957+561, oben im blauen, unten im roten Licht. Die Lichtkurven in beiden Diagrammen sind um den Betrag der Laufzeitdifferenz von 417 Tagen gegeneinander verschoben, so dass sie nun übereinander liegen.

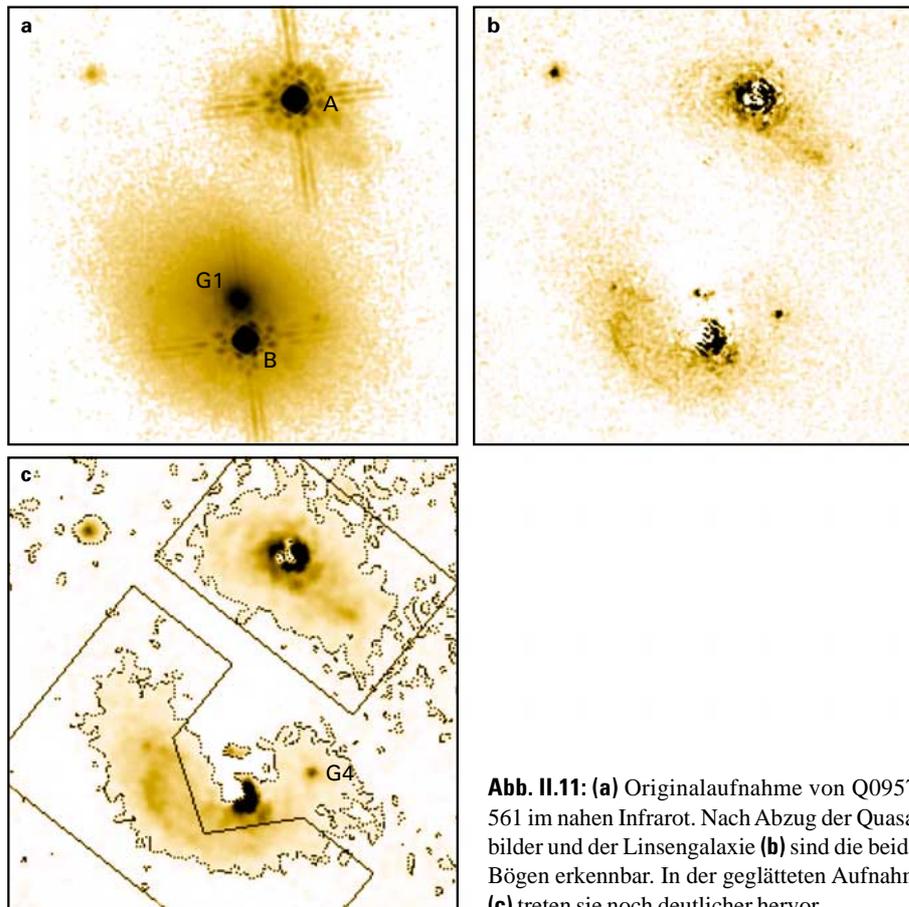


Abb. II.11: (a) Originalaufnahme von Q0957+561 im nahen Infrarot. Nach Abzug der Quasarbilder und der Linsengalaxie (b) sind die beiden Bögen erkennbar. In der geglätteten Aufnahme (c) treten sie noch deutlicher hervor.

niert ist. Doch schon jetzt stellt der zweite Wert eine gute, unabhängige Bestätigung der derzeit besten Schätzung an Hand von nahen Galaxien dar. Dieser Wert beträgt $67 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$.

Wie schwierig diese Art der Bestimmung der Hubble-Konstante ist, zeigt auch der Fall des Systems Q 0957 +561. Es ist das erste bekannte Linsensystem, 1979 entdeckt. Es besteht aus einer Linsengalaxie bei $z = 0.36$ in einem Haufen, die von einem Quasar bei $z = 1.41$ zwei Bilder erzeugt. Die Laufzeitverzögerung in den beiden Bildern konnte zu 417 Tagen bestimmt werden (Abb. II.10). Nachdem das Bild der Linsengalaxie durch ein De-Vaucouleurs-Profil und die beiden Quasarbilder als einfache Punktfunktionen modelliert worden waren, ließen sie sich von der Aufnahme subtrahieren. Dadurch wurden zwei lichtschwache Bögen erkennbar, die sich an die beiden Bilder A und B anschlossen (Abb. II.11). In beiden Fällen handelt es sich um die gelinsten und nahezu zu einem Einstein-Ring verzerrten Bilder der Muttergalaxie des Quasars. Diese beiden Bögen wurden in den CASTLES-Aufnahmen entdeckt und bilden jetzt eine ganz wesentliche Einschränkung für das Massenmodell der Linsengalaxie.

Bisherige Massenmodelle beschrieben die Linsengalaxie mit kreisförmiger oder elliptischer Symmetrie. In der neuen Arbeit des CASTLES-Team war es erstmals möglich,

aus den Beobachtungen eine innere Struktur der Galaxie abzuleiten. Außerdem wurde der Beitrag der umgebenden Galaxien berücksichtigt, der geringer sein muss als bis dahin angenommen. Generell wurde deutlich, dass die bisherigen Modelle und die aus ihnen abgeleiteten Werte für die Hubble-Konstante falsch waren. Schließlich ließ sich insbesondere wegen der Entdeckung der beiden Bögen das Massenmodell genauer bestimmen. Dennoch blieb auch hier eine Mehrdeutigkeit, die zu einer Ungenauigkeit in der Hubble-Konstante von 25 % führt. Als wahrscheinlichster Wert blieb schließlich eine Obergrenze von $80 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$. Er gilt wieder für $\Omega = 1$. Für ein offenes Universum mit $\Omega = 0.3$ verschiebt sich die Grenze nach $H_0 = 84 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$.

Auch wenn dieser Versuch für den Wert der Hubble-Konstante noch nicht die erhoffte Genauigkeit erbringen konnte, macht das Verfahren Hoffnung. Mit Sicherheit wird sich das Resultat noch wesentlich verbessern lassen, wenn es gelingt, die jetzt nur schwach erkennbaren Teile der Einstein-Ringe auf länger belichteten Aufnahmen deutlicher herauszuarbeiten. Außerdem sollte es möglich sein, mit den neuen Röntgenteleskopen Chandra (USA) und Newton (ESA) das heiße Gas des Galaxienhaufens, in dem sich die Linsengalaxie befindet, zu beobachten. Daraus sollte sich dann ein verbessertes Massenmodell des Haufens ableiten lassen.

Die Entwicklung elliptischer Galaxien

Die Entstehung und Entwicklung von Galaxien ist ein zentrales Problem der modernen Astrophysik. Bisherige Beobachtungen deuten darauf hin, dass die Sterne in den meisten elliptischen und S0-Galaxien, die sich in reichen Haufen befinden, in einer frühen Epoche entstanden sind. Anschließend haben sich die Systeme nur noch passiv weiterentwickelt. Das heißt, die einmal entstandene Sternpopulation alterte stetig, ohne dass sich später neue Sterne bildeten. Dadurch wurde sie mit der Zeit immer röter und lichtschwächer. Diese frühe Bildungsphase wird in einer Ära erwartet, als das Universum etwa 10 bis 20 % seines heutigen Alters hatte, also 1.4 bis 2.8 Milliarden Jahre alt war. Dies entspricht einem Rotverschiebungsbereich von $2 < z < 3$.

Für dieses Szenario spricht die Beobachtung, dass die elliptischen und S0-Galaxien in Haufen bis zu einer Rotverschiebung von etwa $z = 1$ sehr ähnliche Farben besitzen, sowohl innerhalb eines Haufens als auch von einem Haufen zum anderen. Dies ließe sich kaum erklären, wenn in den Galaxien noch über Jahrmilliarden unabhängig voneinander und in unterschiedlichem Maße neue Sterne entstanden wären. Besonders auffällig ist eine Korrelation, die Ende der 80er Jahre entdeckt wurde: Mit zunehmendem effektivem Radius steigt die Geschwindigkeitsdispersion an, während die mittlere Flächenhelligkeit abfällt. Trägt man diese Größen in einem dreidimensionalen Diagramm gegeneinander auf, so liegen die Galaxien sehr nahe an einer Ebene, der so genannten Fundamentalebene. Sie lässt sich durchaus physikalisch erklären, wenn man die Galaxien als Vielteilchensysteme betrachtet, die sich im Virialgleichgewicht befinden.

Diese Korrelation ließ sich bislang nur für elliptische und S0-Galaxien in reichen Haufen verifizieren, die in früheren Epochen (bei Rotverschiebungen zwischen 0.5 und 1) nur einen sehr kleinen Teil der gesamten Galaxienpopulation ausmachten. Ob dies auch auf Galaxien dieses Typs in weniger dichten Haufen zutrifft, ist bislang weitgehend unklar. Es gibt theoretische Modelle, wonach sich die Feldgalaxien später gebildet haben als diejenigen in reichen Haufen, oder anders gesagt, die Sternpopulation der Feldgalaxien jünger ist als diejenige in den Haufengalaxien. Dies lässt sich jetzt testen: Da sich beispielsweise die Leuchtkraft einer Galaxie mit zunehmendem Alter verändert, sollten die Feldgalaxien nicht auf der Fundamentalebene der Haufengalaxien liegen.

Um Entwicklungseffekte bei Feldgalaxien zu finden, eignet sich die Gruppe der als Gravitationslinsen wirken-

den Galaxien: Es sind überwiegend massereiche elliptische und S0-Galaxien in einem Rotverschiebungsbereich zwischen 0 und 1, die sich nicht im Zentrum reicher Haufen befinden. Denn die Wahrscheinlichkeit, dass eine Galaxie als Linse fungiert, hängt nur unwesentlich von ihrem Umfeld ab.

In den bisher untersuchten Fällen wurde die Fundamentalebene stets von Galaxien eines einzigen Haufens bestimmt, dessen Mitglieder alle im Wesentlichen die selbe Rotverschiebung besitzen. Bei der Analyse der Linsengalaxien hat man es aber mit Einzelsystemen bei unterschiedlichen Rotverschiebungen und damit auch in unterschiedlichen Entwicklungsstadien zu tun.

Hintergrund der neuen Analyse ist die Tatsache, dass sich die Oberflächenhelligkeit stark mit der Rotverschiebung ändert und dies in Abhängigkeit von der Farbe. Misst man nun den effektiven Radius und die Geschwindigkeitsdispersion einer Galaxie, so kann man bei Zugehörigkeit zur Fundamentalebene die Oberflächenhelligkeit berechnen. Diese extrapoliert man auf den Wert, den die Galaxie heute (bei $z = 0$) hätte, um sie mit den Werten von gut vermessenen nahen Galaxien vergleichen zu können.

Diese Transformation nach $z = 0$ hängt vom kosmologischen Modell und von der Epoche der Sternentstehung ab. Die derzeit wahrscheinlichsten kosmologischen Modelle sind ein flaches Universum mit $\Omega_0 = 0.3$ und $\Lambda = 0.7$ oder ein offenes Universum mit $\Omega_0 = 0.3$.

Da nur für wenige Linsengalaxien Spektren vorliegen, mussten die relevanten Größen der Fundamentalebene aus dem Winkelabstand der Linsenbilder und aus den photometrischen Daten gewonnen werden. Die Geometrie liefert beispielsweise über das Massenmodell einer isothermen Sphäre die Gesamtmasse der Linsengalaxie und somit auch die Geschwindigkeitsdispersion. Die effektiven Radien und scheinbaren Helligkeiten wurden für alle Filter bestimmt; für die Hubble-Konstante wurde der Wert $H_0 = 65 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$ angenommen.

Unter diesen Voraussetzungen ließen sich die Galaxien aus dem CASTLES-Datensatz am besten mit dem kosmologischen Modell des offenen Universums und einer Sternentstehung in den Galaxien bei $z > 2$ erklären. Nur für diese Lösung gibt es im nahen Universum Galaxien, die man als weiterentwickelte Versionen der beobachteten Linsengalaxien betrachten kann.

Dieses Ergebnis widerspricht einem erst kürzlich aufgestellten Modell, wonach sich die Feldgalaxien (hier also die Linsengalaxien) erst bei Rotverschiebungen zwischen $z = 0.5$ und $z = 1.5$ gebildet haben. Es belegt, dass sich elliptische und S0-Galaxien unabhängig von ihrer Umgebung in gleicher Weise entwickelt haben.

II.3. Kohlenwasserstoffe – rätselhafte Akteure im Staub

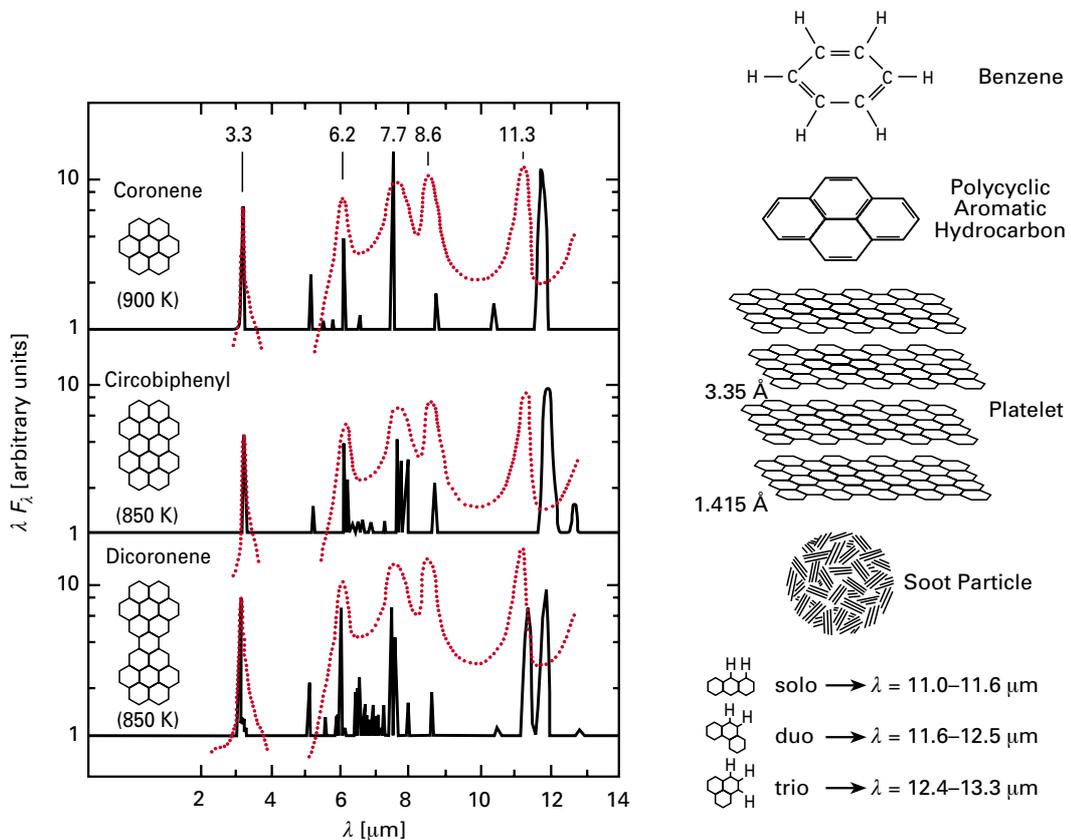
Vor fast 30 Jahren wurden im nahen Infrarotbereich Emissionsbänder entdeckt, die zunächst keiner bekannten Moleküart zugeordnet werden konnten. Seitdem fand man sie fast überall im interstellaren Medium, in Planetarischen Nebeln, HII-Regionen und Reflexionsnebeln. Mitte der 80er Jahre tauchte die Vermutung auf, dass große organische Moleküle, so genannte Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAHs), die Ursache der Infrarotemissionen sein könnten. Mit ISOHOT gelang es jetzt erstmals, diese spektroskopische Signatur auch im interstellaren Zirkus und in der diffusen IR-Hintergrundstrahlung der Milchstraße nachzuweisen sowie in einer anderen Spiralgalaxie zu kartieren. Die Beobachtungen sprechen für die allgegenwärtige Existenz der PAHs. Sie unterstreichen ihre ungewöhnliche Stabilität und ihre große Bedeutung als sehr effektives, interstellares »Kühlmittel«: Die PAHs absorbieren die UV-Strahlung und geben die aufgenommene Energie in Form der beobachteten IR-Strahlung wieder ab. Die neuen, mit ISO gewonnenen Daten haben die Diskussion über diese Klasse komplexer Moleküle stark angeheizt, und mittlerweile füllen die Hypothesen über denkbare organisch-chemische Vorgänge im interstellaren Medium ganze Tagungsbände.

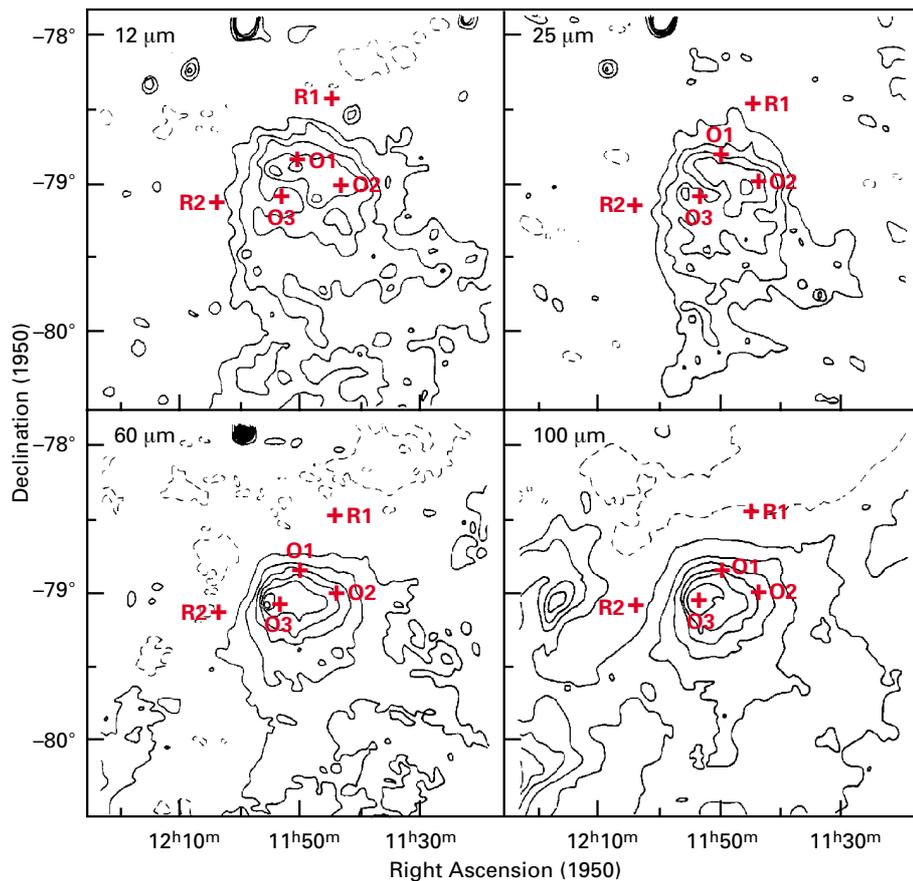
Die Emissionsbänder treten am deutlichsten bei den Wellenlängen 3,3, 6,2, 7,7, 8,6 und 11,3 μm auf. Die Herkunft dieser »unidentifizierten Infrarotbänder« war anfänglich unklar. Diskutiert wurden Staubkörner aus amorphen Kohlenwasserstoffen, Kohlenstoffkompositverbindungen, Kohle oder eben jene PAHs (Abb. II.12). Letzte Klarheit lässt sich nur über den Vergleich mit Laborspektren der entsprechenden Stoffe erhalten. Und die sprachen zunehmend für PAHs.

Interstellarer Zirkus

Als der Infrarotsatellit IRAS in den 80er Jahren die erste Himmelsdurchmusterung im Infraroten durchführte, stellten die Astronomen fest, dass ein Großteil des Himmels mit Wolken bedeckt ist, die insbesondere bei 100 μm intensiv leuchten. Man nennt diese Wolken interstellaren

Abb. II.12: Die Emissionsbänder unterschiedlicher PAHs im Infraroten (links) und denkbare Möglichkeiten, wie ausgehend von einem Ringmolekül (rechts oben) durch weitere Zusammenlagerung Rußteilchen (rechts unten) entstehen können.





Zirkus. Einige dieser Zirkuswolken traten überdies in einem Wellenlängenbereich zwischen 12 und 25 μm stark hervor. Bis zu 30 % der gesamten IR-Strahlung kamen aus diesem Bereich – ein zu großer Anteil, als dass er allein durch thermisch strahlende Staubkörnchen beschrieben werden könnte. Es tauchte daher schon damals die Vermutung auf, dass auch hieran die »unidentifizierten Infrarotbanden« einen großen Anteil hatten. Auf Grund der IRAS-Daten ließ sich dies nicht entscheiden.

Es blieben aber Zweifel an dieser Interpretation. In den anderen Gebieten, in denen diese IR-Linienbanden beobachtet wurden, herrschten intensive UV-Strahlungsfelder von heißen Sternen, welche die mutmaßlichen PAHs zum Strahlen anregten. In den Zirkuswolken aber war die UV-Intensität um zwei bis drei Größenordnungen geringer und möglicherweise also nicht in der Lage, die Teilchen ausreichend anzuregen.

Mit ISOPHOT beobachteten Astronomen des MPIA zusammen mit Kollegen der Universitäten von Helsinki und Paris eine Zirkuswolke, die zu dem großen Dunkelwolkenkomplex im Sternbild Chamäleon gehört. Ihre Entfernung wird auf etwa 550 Lichtjahre geschätzt. An drei Positionen in einem gegenseitigen Abstand von etwa 20 Bogenminuten wurden in einem Wellenlängenbereich von 3.3 bis 16 μm die IR-Flüsse gemessen (Abb. II.13). Hierfür standen neun Filter zur Verfügung. Als Referenz wurde zudem die Helligkeit an zwei Positionen außerhalb der Wolke gemessen. Damit ließ sich der allgemeine Vordergrund des infra-

Abb. II.13: IRAS-Karten der mit ISO beobachteten Zirkuswolke G 300.2-16.8. Eingetragen sind die Beobachtungspositionen innerhalb (O) und außerhalb (R) der Wolke.

roten Zodiaklichts abziehen. Diese Emission stammt von Staub in unserem Sonnensystem und nicht von der Zirkuswolke.

In dem verbleibenden IR-Signal ließen sich schließlich die Signaturen der unidentifizierten Infrarotbanden ausmachen. Wie erwartet, ist der absolute Strahlungsfluss der Infrarotbanden um rund das Tausendfache geringer als beispielsweise in HII-Regionen. Eine genaue Analyse zeigte aber, dass sie 40 bis 50 % der Gesamtemission im Bereich zwischen 6.5 und 16 μm Wellenlänge ausmachen. Gleichzeitig ließ sich eine Kontinuumemission feststellen. Sie könnte von PAH-Clustern oder sehr kleinen Silikatkörnchen, stammen.

Das unterstreicht die Bedeutung, die diesen Teilchen im interstellaren Medium zukommt: Sie setzen einen großen Teil der UV-Strahlung in IR-Strahlung um. Die UV-Strahlung heizt das interstellare Medium auf, weil sie bereits auf kurzen Distanzen von Staub und Molekülen absorbiert wird. Dagegen kann die IR-Strahlung bei Wellenlängen, die größer als die Durchmesser der Staubkörner sind, die interstellare Materie verhältnismäßig ungehindert durchdringen und führt dadurch die in der heißen UV-Strahlung enthaltene Energie aus dem Entstehungsgebiet ab.

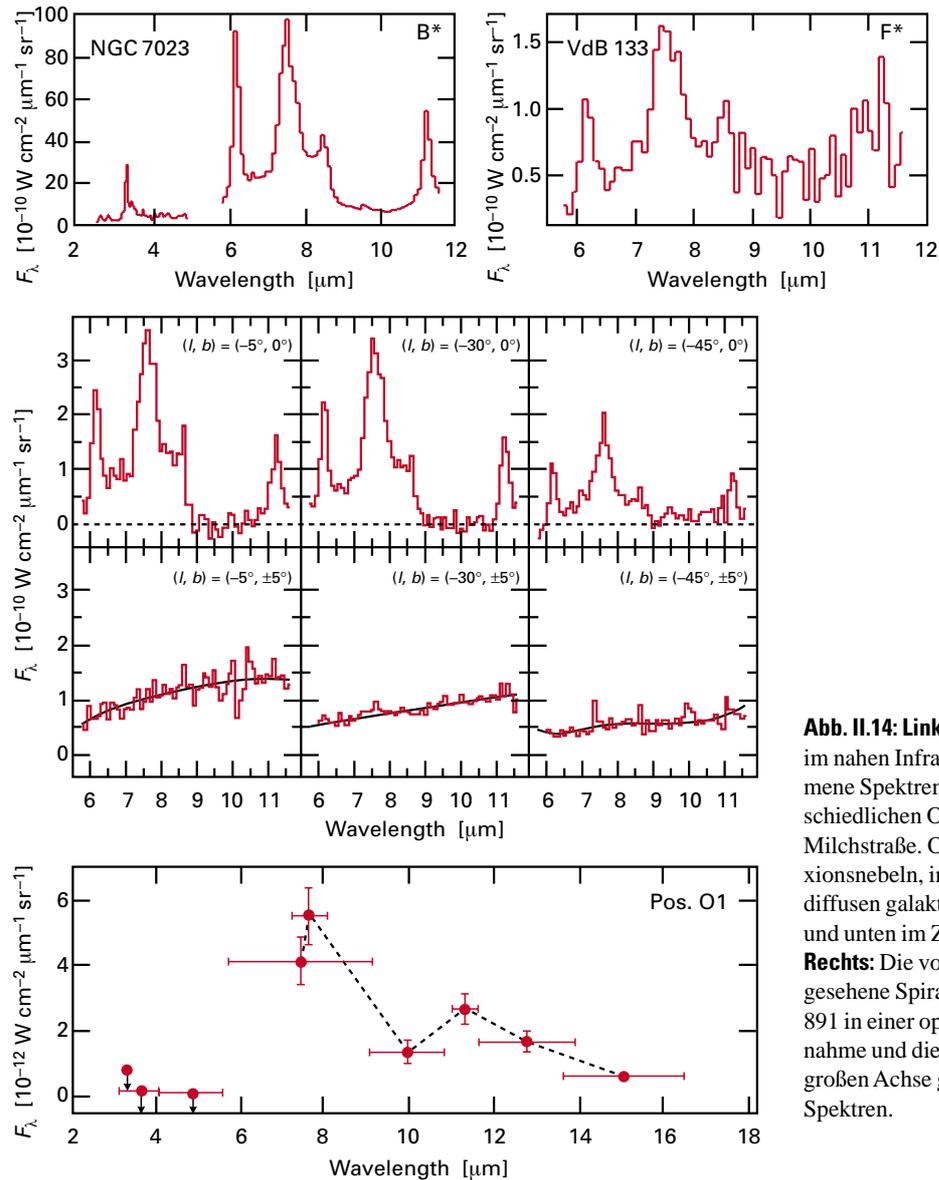


Abb. II.14: Links: Mit ISOPHOT im nahen Infrarot aufgenommene Spektren von unterschiedlichen Objekten in der Milchstraße. Oben in Reflexionsnebeln, in der Mitte im diffusen galaktischen Medium und unten im Zirrus.

Rechts: Die von der Kante gesehene Spiralgalaxie NGC 891 in einer optischen Aufnahme und die entlang ihrer großen Achse gewonnenen Spektren.

Diffuser Staub in der Milchstraße

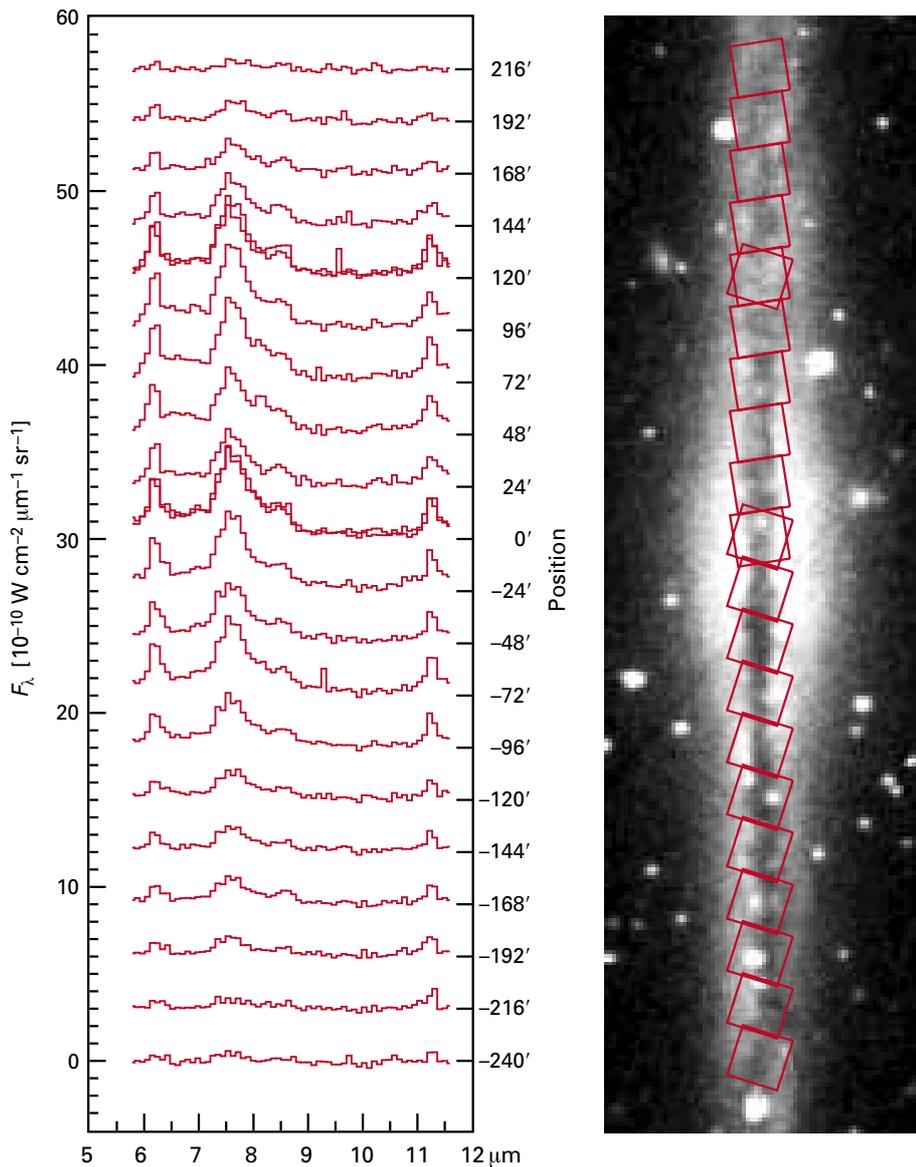
Im Rahmen eines Beobachtungsprogramms mit ISOPHOT innerhalb der Garantiezeit wurde der Versuch unternommen, die Linienbanden auch im diffusen interstellaren Staub nachzuweisen. Hierzu wurden mehrere Felder entlang der galaktischen Ebene mit dem ISOPHOT-Spektrometer beobachtet. Die Positionen wurden so ausgesucht, dass keine im Infrarot oder im Optischen hellen Objekte in der Nähe waren. Auch hier musste zunächst die IR-Emission des Zodiakallichts subtrahiert werden. Sie wurde aus Feldern ober- und unterhalb des galaktischen Äquators ermittelt, wo die Strahlung des diffusen galaktischen Mediums vernachlässigbar ist. Anschließend waren an allen Positionen die Hauptlinien bei 6.2, 7.7, 8.6 und 11.3 μm klar erkennbar (Abb. II.14).

Auch hier erbrachte eine quantitative Abschätzung, dass die Bänder der mutmaßlichen PAHs mindestens

50 % bis 60 % der mit IRAS gemessenen IR-Emission ausmachen. Obwohl die UV-Strahlungsfelder im Bereich der diffusen Wolken um Faktoren 100 bis 1000 geringer ist als typischerweise in Reflexionsnebeln oder HII-Regionen, sind die relativen Intensitäten der Linien sehr ähnlich.

Die Spiralgalaxie NGC 891

In vielen Galaxien mit aktivem Kern oder intensiver Sternentstehung ließen sich mit ISO die Infrarotbanden nachweisen. Im vergangenen Jahr gelang es jedoch erstmals, diese Emission auch im interstellaren Staub einer ganz normalen Galaxie zu kartieren. Die 30 Millionen Lichtjahre entfernte Spiralgalaxie NGC 891 eignet sich besonders gut für die Suche nach der Infrarotemission, weil man unmittelbar auf die Kante des Sternsystems



schaut und somit die Staubdichte im Sehstrahl (Säulendichte) sehr hoch ist. NGC 891 ist eine Spiralgalaxie vom Typ Sb und ähnelt damit stark dem Milchstraßensystem. Hoch aufgelöste Aufnahmen (Abb. II.14) zeigen bis in Entfernungen von etwa 5000 Lichtjahren von der Mittelebene ein verzweigtes Netz von Staubwolken mit durchschnittlichen Größen von 150 bis 300 Lichtjahren und geschätzten Massen zwischen 2×10^5 und 4×10^6 Sonnenmassen. Da dieses Sternsystem auch in anderen Wellenlängenbereichen bereits detailliert untersucht worden war, ergab sich die Gelegenheit, die räumliche Verteilung unterschiedlicher Konstituenten des interstellaren Mediums zu vergleichen.

Entlang der Mittelachse von NGC 891 wurden an 20 Positionen spektrophotometrisch die Infrarotflüsse bestimmt (Abb. II.14). Die eingesetzte Blende mit 24 Bogensekunden Kantenlänge entspricht einem Gebiet von 3500 Lichtjahren Ausdehnung. Deutlich sind die Emis-

sionsbanden im nahen IR bis in Entfernungen von 30000 Lichtjahren nördlich und südlich des Galaxienkerns erkennbar. Die Spektren ähneln sehr denjenigen aus der Milchstraße, und die Intensität bei $7.7 \mu\text{m}$ ist nur unwesentlich höher als diejenige der diffusen Emission in unserer Milchstraße.

Die Emissionsgebiete sind nahezu symmetrisch zum Mittelpunkt angeordnet. Im Zentrum zeigt sich ein deutliches Maximum. Von dort aus nimmt die Intensität zu beiden Seiten hin ab, um dann in einem Bereich zwischen 70 und 120 Bogensekunden (10000 und 17000 Lj) südlich und nördlich des Zentrums wieder anzusteigen. Wahrscheinlich handelt es sich hier um ein ringförmiges Gebiet, das den Kern von NGC 891 umgibt (Abb. II.15). Diese Verteilung stimmt bemerkenswert genau mit derjenigen von molekularem CO-Gas und kühlem Staub überein, der bei einer Wellenlänge von 1.3 mm gemessen wurde. Genau dies erwartet man, wenn die Infrarotemission der

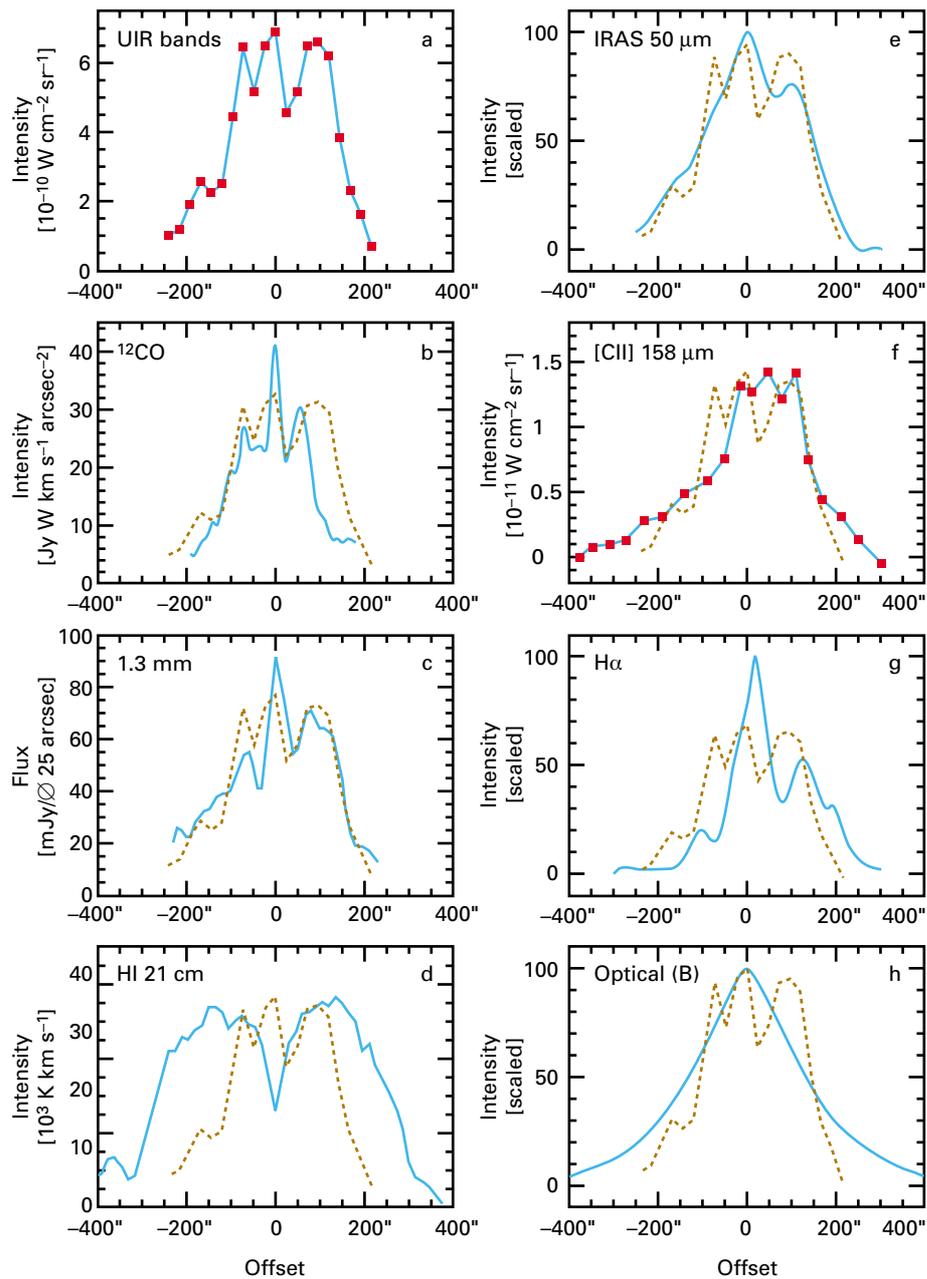


Abb. II.15: Intensitätsverteilung unterschiedlicher Komponenten des interstellaren Mediums entlang der großen Achse von NGC 891. Die Verteilung der Infrarotbanden (**a**) folgt in etwa derjenigen des Kohlenmonoxid (**b**), nicht jedoch der beispielsweise von ionisiertem Wasserstoff ($H\alpha$, (**g**)). Die gestrichelten Linien geben jeweils die Verteilung der Infrarotbanden aus (**a**) wieder.

PAHs in staubreichen Gebieten entsteht, wie es in der Milchstraße beobachtet wurde.

Andererseits weicht die beschriebene IR-Verteilung deutlich von derjenigen der ionisierten Komponente des interstellaren Mediums, wie H^+ und C^+ , ab. Dies ist insofern etwas verwunderlich, als nach gängiger Meinung die PAHs durch UV-Strahlung bei Wellenlängen unterhalb

von 400 nm angeregt werden. Man könnte daher erwarten, dass die Verteilung beispielsweise von C^+ etwa derjenigen des interstellaren UV-Strahlungsfeldes folgt und damit auch etwa mit derjenigen der PAHs übereinstimmt. Dass dies nicht der Fall ist, deutet auf besondere Eigenschaften der PAHs im interstellaren Medium hin.

Eigenschaften der PAHs

Wollte man die mit ISOPHOT gemessenen Flüsse in den Emissionsbanden des nahen IR durch thermische Strahlung von Staubteilchen erklären, so müssten ihre Temperaturen 100 K und mehr betragen. Dies ist angesichts der dort herrschenden Strahlungsflüsse ausgeschlossen. In-

sofern unterstützen die ISOPHOT-Daten die Vermutung, dass PAHs die Emissionsbanden erzeugen. Allerdings geben die Intensitätsverhältnisse der Linien einige Rätsel auf.

In Gebieten mit sehr intensivem UV-Strahlungsfeld, wie in heißen HII-Regionen und Planetarischen Nebeln, sind die Linien der PAHs im Bereich von 11 bis 13 μm schwächer als diejenigen bei 6.2 und 7.7 μm . In schwachen Strahlungsfeldern, wie dem interstellaren Zirkus oder den diffusen Wolken, sollten sich die Intensitätsverhältnisse genau umkehren. Das aber wird nicht beobachtet. Die Intensitätsverhältnisse, beispielsweise $I(11.3 \mu\text{m})/I(7.7 \mu\text{m})$, liegen in den diffusen interstellaren Wolken bei 0.24, im Zirkus bei 0.4 und in Planetarischen Nebeln, HII-Regionen und Reflexionsnebeln bei 0.2 bis 0.3. Und das, obwohl sich die Strahlungsfelder in der Intensität bis um das Tausendfache unterscheiden. Bei NGC 891 ließ sich dieses Intensitätsverhältnis sogar entlang der Mittelachse bestimmen. Es steigt hier von Nord nach Süd fast kontinuierlich von 0.2 auf 0.5 an.

Dieses im Widerspruch zur Theorie stehende Verhalten der Linienintensitäten hat viel Diskussionsstoff geliefert und zu verschiedenen Lösungsmöglichkeiten geführt. So wurde vorgeschlagen, dass die PAHs bei intensiver UV-Einstrahlung Wasserstoffatome verlieren können, wo-

durch sich die Strahlungseigenschaften der Moleküle verändern würden. Diese Hypothese ließ sich jedoch nicht mit allen Beobachtungsdaten in Einklang bringen. Bessere Übereinstimmung findet man z.B. bei NGC 891, wenn man zusätzlich die Existenz von ionisierten PAHs in Betracht zieht, wobei sich der Ionisationsgrad als Gleichgewicht zwischen Ionisation im UV-Strahlungsfeld und Rekombination mit freien Elektronen (also der Elektronendichte) einstellt.

Diese beiden Mechanismen, Wasserstoffabspaltung und Ionisation, könnten möglicherweise die gemessenen Intensitätsverhältnisse der Linienbanden im mittleren IR erklären. Auf jeden Fall sprechen immer mehr Indizien dafür, dass diese Linien von PAHs stammen. Diese, kleinen Rußpartikelchen ähnlichen Stoffe sind demnach im Welt- raum weit verbreitet und spielen in der Strahlungsbilanz des interstellaren Mediums eine ganz wesentliche Rolle. Auch für die Kosmochemie könnten sie von Bedeutung sein. So haben amerikanische Wissenschaftler von Eismänteln umhüllte PAHs einer UV-Strahlung ausgesetzt, wie sie auch im interstellaren Raum auftritt. Interessanterweise formten sich diese PAHs dabei in biogene Substanzen wie Alkohole und Ether um. PAHs können also auch bei der Entstehung komplexer organischer Moleküle im Welt- raum eine Schlüsselrolle spielen.

III Instrumentelle Entwicklungen

Die Leistungsfähigkeit eines Teleskops lässt sich grundsätzlich auf zwei Arten steigern. Zum einen kann man Größe und Oberflächenqualität des Hauptspiegels verbessern. Dadurch sammelt man mehr Licht und erzeugt schärfere Bilder, wodurch man zu lichtärmeren Objekten vordringen kann. Zum anderen kann man aber auch das Messgerät, das in der Brennebene des Teleskops ein Abbild oder ein Spektrum des anvisierten Himmelsausschnitts registriert, vervollkommen. Am MPIA wurden in den vergangenen Jahren eine ganze Reihe von Instrumenten entwickelt und gebaut, mit denen sich die Effizienz der Teleskope deutlich verbessern und deren Einsatzgebiete erweitern ließen. Hierzu zählen insbesondere der Wide Field Imager, eine Kamera mit extrem großem Bildfeld, das adaptiv optische System ALFA und der Multi-Objekt-Spektrograph MOSCA (s. Jahresbericht 1998, S. 33, 38 und 41).

Diese Instrumente werden in den Werkstätten des Instituts in Zusammenarbeit mit großen und kleinen Firmen entworfen und 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.

Auch der Einsatz von Charge Coupled Devices (CCDs) hat die astronomische Forschung stark vorangebracht. CCDs sind lichtempfindliche Halbleiter, die je nach Wellenlänge des einfallenden Lichtes zwischen 60 und nahezu 100 Prozent Quantenausbeute erzielen. Diese wenige Quadratzentimeter großen Plättchen sind aus einer Vielzahl lichtempfindlicher Bildelemente (Pixel) zusammengesetzt. Die größten CCDs weisen mehrere Millionen Pixel auf. Das auftreffende Licht erzeugt in dem Material eine elektrische Ladung, die in dem Pixel gespeichert wird. Am Ende jeder Belichtung liest eine spezielle Elektronik den CCD-Chip aus und ein entsprechendes Computerprogramm setzt das Ladungsbild in ein optisches Bild um. Von entscheidendem Vorteil für die Astronomen ist, dass die Anzahl der erzeugten Ladungsträger zur auftreffenden Lichtintensität streng proportional ist.

Am Teleskop können keine handelsüblichen CCDs eingesetzt werden. Nur die qualitativ hochwertigsten Chips eignen sich für die Astronomie. Sie werden von Firmen, wie Philips oder Rockwell 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 mit künstlichem Stern

Theoretisch hängt das Auflösungsvermögen eines Teleskops, also seine Fähigkeit, zwei nahe beieinander stehende Objekte noch getrennt abzubilden, ausschließlich vom Durchmesser des Hauptspiegels und der Wellenlänge des Lichtes ab. Im sichtbaren Bereich (Wellenlänge etwa 550 nm) besitzt ein 3.5-Meter-Teleskop ein theoretisches Auflösungsvermögen, auch Beugungsgrenze genannt, von 0.03 Bogensekunden, bei 2.2 μm ist es mit 0.13 Bogensekunden rund viermal geringer. Damit ließen sich auf dem Mond noch bis zu 300 Meter große Details wahrnehmen. In der Praxis verschmiert jedoch die Luftunruhe länger belichtete Aufnahmen so stark, dass die Auflösung typischerweise nur noch eine Bogensekunde beträgt. Das heißt, kein Großteleskop erreicht eine bessere Auflösung als ein 15-Zentimeter-Fernrohr!

Astronomen und Ingenieure am MPIA haben in Zusammenarbeit mit Kollegen vom MPI für extraterrestrische Physik in Garching ein adaptiv optisches System für den nahen Infrarotbereich gebaut, das es ermöglicht, die Bildschwankungen während der Belichtung zu korrigieren (vgl. Jahresbericht 1997, S. 11). Es funktioniert etwa wie folgt: Eine ebene Welle des Sternlichts erreicht die Erdatmosphäre und wird darin verformt, ähnlich wie ein Tuch im Wind. Bei der Ankunft im Teleskop weist sie »Berge und Täler« mit Höhen im Bereich von einem Mikrometer auf. Im Innern des Teleskops spaltet nun ein Strahlteiler die Welle in zwei Teilstrahlen auf. Während die eine Teilwelle auf einen kleinen adaptiven Spiegel fällt und von dort in die Kamera eintritt, gelangt die andere zu einem so genannten Wellenfrontsensor. Der analysiert die Form der Welle und gibt diese an einen Computer weiter. Der Computer rechnet aus diesen Informationen aus, wie die Oberfläche des flexiblen, adaptiven Spiegels verbogen werden muss, um die Form der anderen Teilwelle zu korrigieren. Umgesetzt werden diese Befehle von kleinen Stellfüßchen an der Rückseite des adaptiven Spiegels.

Dieses Verfahrens funktioniert nur, wenn der Spiegel so schnell adaptiert werden kann, dass die eintreffenden Wellenzüge nach ausgeführter Korrektur nicht bereits anders

deformiert sind als der gerade analysierte Wellenzug. Die Theorie zeigt, dass bei $10\ \mu\text{m}$ Wellenlänge und gutem Seeing etwa zehn Korrekturen pro Sekunde nötig sind. Im Bereich von 1 bis $2.5\ \mu\text{m}$, in dem mit ALFA beobachtet wird, sind dagegen schon etwa 200 Neueinstellungen pro Sekunde für eine gute Korrektur nötig.

Eine zentrale Rolle spielt bei ALFA der Wellenfrontsensor, der die Lichtwelle analysiert. Damit er schnell genug arbeiten kann, benötigt er einen Referenzstern von mindestens 13.5ter Größe. Ist der abzubildende Himmelskörper selbst hierfür zu lichtschwach, so muss ein anderer gefunden werden, der allerdings nicht weiter als etwa 30 Bogensekunden von dem interessierenden Objekt entfernt sein darf.

Wenn sich diese Bedingung nicht erfüllen lässt, müssen sich die Astronomen mit einem Trick behelfen: Sie schießen parallel zur Blickrichtung des Teleskops einen Laserstrahl zum Himmel. In einer Höhe um 90 Kilometer trifft dieser auf eine mit Natriumatomen angereicherte Atmosphärenschicht. Die Wellenlänge des Lasers ist so eingestellt, dass er die Natriumatome zum Leuchten anregt. Auf diese Weise entsteht über dem Teleskop ein Lichtfleck, ein »künstlicher Stern«, der im Idealfall einem Stern 10. Größe entspricht. Er dient der adaptiven Optik während der Bildkorrektur als heller Vergleichssterne. ALFA kann somit bei vergleichbarer Wellenlänge schärfere Bilder als das Weltraumteleskop Hubble liefern. Damit steht das MPIA an vorderster Front der Forschung.

ALFA liefert mittlerweile routinemäßig beugungsbegrenzte Aufnahmen und auch Spektren im nahen Infrarot bei natürlichen Referenzsternen bis zur 11. Größe. Bis herab zu einer Helligkeit von $13.5\ \text{mag}$ sind immer noch nahezu beugungsbegrenzte Aufnahmen möglich. Damit ließ sich die Auflösung des 3.5-Meter-Teleskops etwa um einen Faktor sechs verbessern.

Im Berichtsjahr gelang es erstmals, mit dem Laserleitstern bei einer Wellenlänge von $2.2\ \mu\text{m}$ (K-Band) nahezu beugungsbegrenzte Aufnahmen zu erzielen. Hierbei wurde ein Strehl-Faktor von 23% erreicht. Der Strehl-Faktor bezeichnet das Verhältnis der Lichtintensität im Zentrum einer Sternabbildung zu der Intensität, welche die ideale, beugungsbegrenzte Abbildung hätte. Bei normalem Seeing von einer Bogensekunde liegt der Strehl-Faktor im nahen Infrarot bei nur etwa 3 %, im Idealfall beträgt er 100 %. Derzeit gibt es weltweit nur ein weiteres System, das mit einem Laserleitstern mit ALFA vergleichbare Qualität erreicht.

Grundsätzlich hängt die Effizienz, mit der sich der Laserleitstern einsetzen lässt, von den meteorologischen Bedingungen ab (s. Jahresbericht 1998, S. 38). Im Berichtsjahr ließ sich die Ausbeute durch eine flexible Handhabung des Beobachtungsplanes weiter verbessern.

Um den Einsatz des Laserleitsterns weiter zu optimieren, wurde das zeitliche Verhalten der leuchtenden Natriumschicht mit einem LIDAR beobachtet. Hierbei schießt man einen gepulsten Laserstrahl in die Atmosphäre. Dieser regt die Natriumatome in der Hochatmosphäre zum

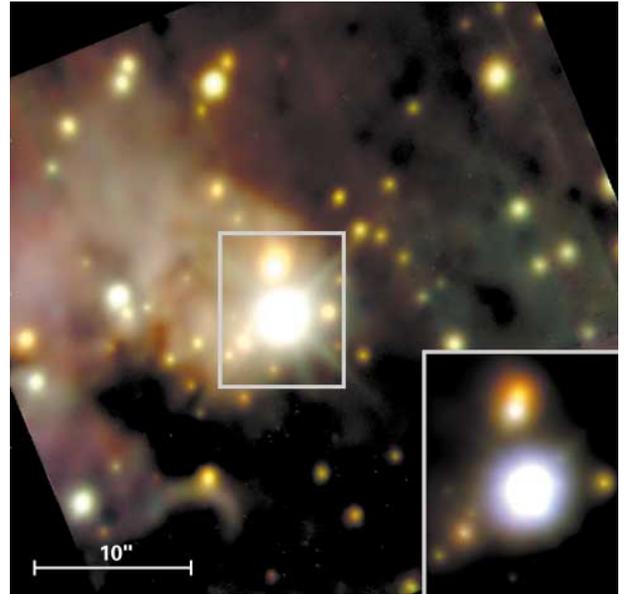


Abb. III.1: Der 5000 Lj entfernte Lagunen-Nebel um den Stern Herschel 36.

Leuchten an, und die von dort ausgesandten Photonen werden mit dem 3.5-Meter-Teleskop wieder registriert. Aus der Laufzeit des Signals lässt sich die Höhe der Natriumschicht ermitteln.

Mit einem solchen LIDAR ließ sich erstmals verifizieren, dass der Schwerpunkt des künstlichen Sterns in 90 Kilometern Höhe liegt. Durch Turbulenzen und andere meteorologische Einflüsse, kann diese Schwerpunktlage jedoch sowohl innerhalb einiger zehn Sekunden als auch von Nacht zu Nacht um mehrere hundert Meter bis zu 1.5 Kilometer schwanken. Gleichzeitig ließ sich in zwei Nächten beobachten, dass die Dicke der Natriumschicht in der Mesosphäre zwischen 10 und 20 Kilometern variierte. Solche Schwankungen können eine Defokussierung des Teleskops vortäuschen. Sie ließen

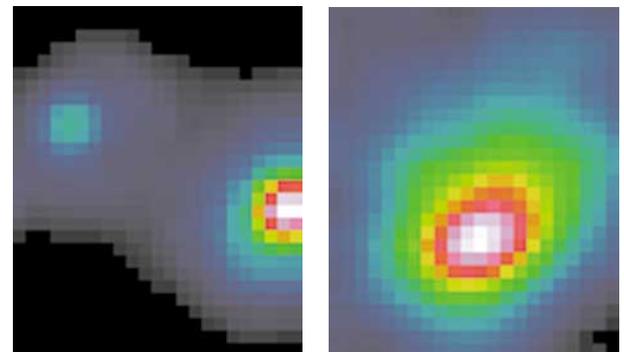


Abb. III.2 (links): Die beiden nur 0.6 Bogensekunden voneinander entfernten Komponenten von Tauri wurden mit ALFA klar getrennt.

Abb. III.3 (rechts): Die aktive Kernregion der Galaxie NGC 1068 ließ sich mit ALFA räumlich auflösen.

sich mit einem regulären LIDAR-Beobachtungssystem sehr schnell erkennen.

Im Berichtsjahr konnten mit ALFA eine ganze Reihe wissenschaftlich brillanter Ergebnisse erzielt werden. Bei Beobachtungen im Lagunen-Nebel, einem bekannten Sternentstehungsgebiet, konnte ALFA erstmals im Infraroten die Staubatmosphäre über einer bereits bekannten protoplanetaren Scheibe nachweisen (Abb. III.1). Diese Hülle aus Gas und Staub wird vom nahen Stern Herschel 36 zum Leuchten angeregt. Solche Staubscheiben sind von aktuellem Interesse, weil sie als Geburtsstätten von Planeten angesehen werden.

Darüber hinaus gelang es beispielsweise, die Bilder der nur 0.7 Bogensekunden voneinander entfernten Komponenten des jungen Sterns T Tauri klar zu trennen (Abb. III.2). Durch Beobachtung in verschiedenen Wellenlängen ist es so möglich, die räumliche Verteilung von molekularem Wasserstoff in diesem Gebiet zu ermitteln. Bei einer Auflösung von 0.25 Bogensekunden wurde der Kernbereich der aktiven Galaxie NGC 1068 beobachtet. Das nur 45 Millionen Lichtjahre entfernte Sternsystem bietet eine ideale Möglichkeit, die Zentralregion, in der sich wahrscheinlich ein Schwarzes Loch befindet, detailliert zu studieren (Abb. III.3).

LAICA – die Weitfeldkamera für den Calar Alto

Fokalreduktoren wie CAFOS oder MOSCA, die in den vergangenen Jahren am Institut entwickelt und gebaut wurden, haben ein relativ großes Gesichtsfeld mit etwa zehn Bogenminuten Durchmesser. Für die Zukunft er-

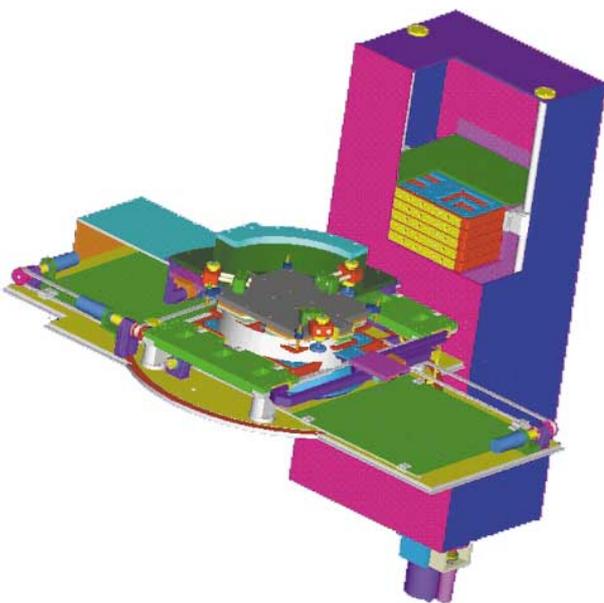


Abb. III.4: Computerzeichnung von LAICA am K3-Korrektor im Primärfokus des 3.5-Meter-Teleskops. Das Licht kommt von unten. Deutlich erkennbar der Verschluss und im Hintergrund das Filtermodul.

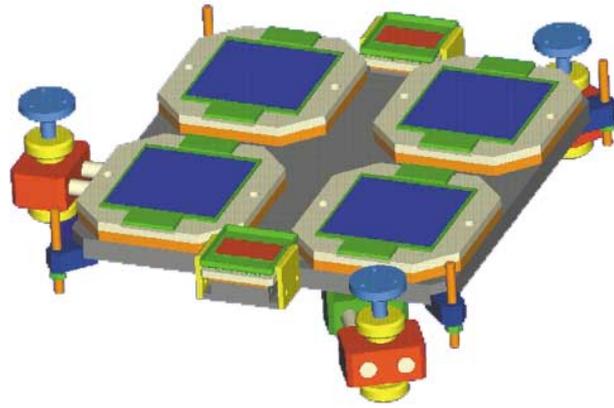


Abb. III.5: Anordnung der vier CCDs in der Brennebene. Die beiden kleinen CCDs ober- und unterhalb des Mosaiks dienen zur Nachführung.

hofft man sich jedoch wesentliche Erkenntnisse von Forschungsprojekten, bei denen schwache Himmelskörper in großen Feldern gesucht werden. Aus diesem Grunde wurde der Bau einer neuen Weitwinkelkamera für das 3.5-Meter-Teleskop auf dem Calar Alto beschlossen. Dieser Large Area Imager for Calar Alto, kurz LAICA (Abb. III.4), wird in Verbindung mit dem dreilinsigen Korrektor im Primärfokus des Teleskops arbeiten. In dieser optischen Anordnung beträgt das Öffnungsverhältnis $f/3.9$, womit ein nutzbares, fehlerfreies Bildfeld von 44 Bogenminuten entsprechend 115 mm Kantenlänge entsteht. Ein so großes Feld lässt sich nicht mit einem einzigen CCD abdecken. Es wurde daher ein Mosaik aus vier CCDs der amerikanischen Firma Lockheed Martin mit jeweils 4096×4096 Pixeln gewählt (Abb. III.5). Die Abbildungsskala wird 0.225 Bogensekunden pro Pixel betragen.

Da die CCDs aus fertigungstechnischen Gründen nicht fugenfrei aneinander stoßen können, bleibt ein etwa 50 mm breiter Spalt frei. Das entspricht der CCD-Breite minus eines Überlapps von ca. 30 Bogensekunden. Nachteilig an dieser Anordnung ist, dass sich mit einer einzigen Aufnahme kein geschlossenes Himmelsgebiet aufnehmen lässt. 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. Der Überlapp ermöglicht die Kontrolle von Astrometrie und Photometrie. Es gibt auch zahlreiche Beobachtungsprojekte, bei denen es lediglich darauf ankommt, einen möglichst großen Himmelsbereich zu erfassen, der nicht notwendigerweise lückenlos sein muss. Ein Nachteil ist jedoch, dass in stärkerem Maße als bei einem Einzel-CCD, das nur den zentralen Bereich des Bildfeldes abdeckt, Verzerrungseffekte auftreten, weil bei LAICA das Bildfeld das CCD-Array genau umschließt und somit Verzerrungen, die nur im Randbereich des Bildfeldes auftreten, auf die Außenbereiche der CCDs fallen. Allerdings

ist die Verzeichnung bis in die Ecken des Feldes geringer als 2 %.

Vorteilhaft an dieser CCD-Anordnung ist, dass man anstelle eines großen Filters vier kleine einsetzen kann. Kleinere Filter sind wesentlich leichter und zu einem geringeren Preis erhältlich als ein großes. Der Filterhalter gleicht dem Magazin eines Diaprojektors. Das Magazin enthält 20 Filter, die ein Greifarm herausnimmt und in den Strahlengang schiebt. Mit dem Verschluss werden Belichtungszeiten bis herunter zu einer Sekunde möglich sein, wobei für die gesamte CCD-Fläche eine bis auf maximal 0.5 % abweichende gleichmäßige Belichtungszeit erreicht werden soll. Zwei kleinere CCDs dienen ausschließlich zur Nachführung. Zwei deswegen, weil sich mit ihnen auch Bild-drehungen, wie sie insbesondere bei langen Beobachtungen auftreten können, feststellen lassen. Sie lassen sich korrigieren, weil die Kamera während der Aufnahme um einige Grad drehbar ist.

Mit dem Bau von LAICA wurde Anfang 1999 begonnen. Die CCDs wurden Anfang 2000 ans Institut geliefert. Im November des Jahres sollen die ersten Integrationstests vorgenommen werden, um dann gegen Ende 2000 die ersten Aufnahmen am Teleskop zu erhalten.

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 MPI für extraterrestrische Physik in Garching und wird an einem der Teleskope des Very Large Telescope, VLT, arbeiten. Das VLT wird derzeit vom European Southern Observatory, ESO, auf dem 2630 Meter hohen Gipfel Paranal in der chilenischen

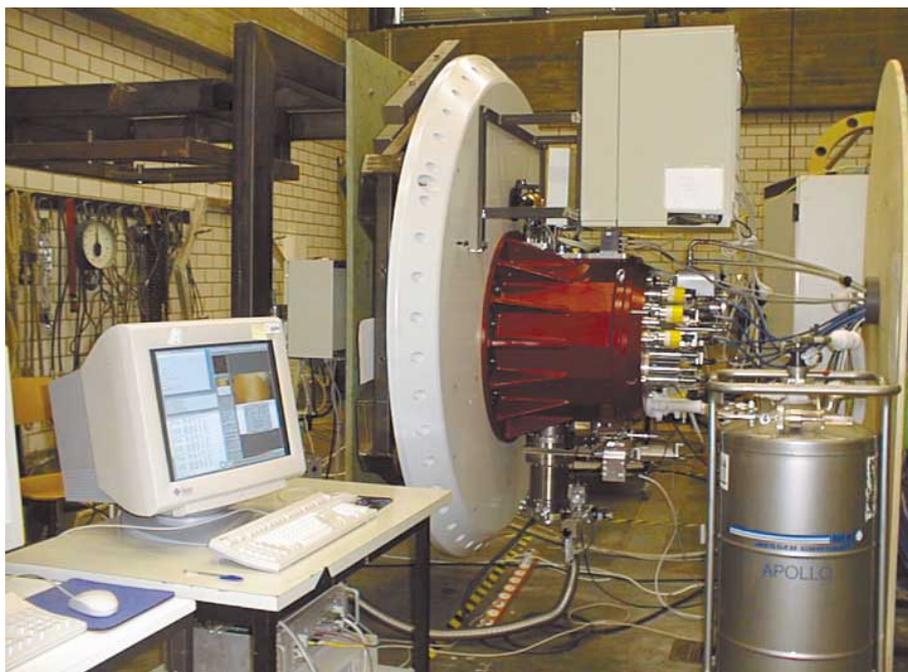
Atacama-Wüste errichtet. Im Endausbau wird es Ende 2000 aus vier Großteleskopen mit Spiegeln von jeweils 8.2 Metern Durchmesser sowie drei kleineren sogenannten Hilfsteleskopen mit 1.8 Metern Öffnung bestehen. Ende 1999 waren bereits drei der 8-Meter-Teleskope sowie mehrere Messgeräte im Einsatz.

Jedes der vier Teleskope verfügt über drei Ausgänge, die mit äußerst leistungsfähigen Kameras und Spektralapparaten bestückt werden. CONICA wird am Nasmyth-Fokus des dritten der vier in Betrieb genommenen Teleskope mit dem Namen Melipal (Kreuz des Südens) arbeiten und zusammen mit dem adaptiv optischen System NAOS im nahen Infrarot von 1 bis 5 μm beugungsbegrenzte Bilder mit einer Auflösung bis herab zu 0.026 Bogensekunden liefern. Die Inbetriebnahme von CONICA zusammen mit der in Frankreich gebauten adaptiven Optik ist für März 2001 vorgesehen.

CONICA wird sich in allen aktuellen Forschungsbereichen einsetzen lassen. Im Vordergrund stehen Untersuchungen von Sternentstehungsgebieten und protoplanetaren Staubscheiben, des galaktischen Zentrums, Gashüllen Roter Riesen und die Suche nach extrasolaren Planeten. Im extragalaktischen Bereich werden Beobachtungen der Zentralgebiete aktiver Galaxien und das Studium entfernter Infrarotgalaxien hohe Priorität besitzen. Den Astronomen der beiden MPIs werden als Gegenleistung für ihre Arbeit an CONICA 45 Beobachtungsnächte zur Verfügung stehen.

Als Detektor dient ein Infrarot-Array mit 1024×1024 Pixeln. Der Abbildungsmaßstab wird zwischen 0.014 und 0.11 Bogensekunden pro Bildlement wählbar sein. Für

Abb. III.6: CONICA bei Tests im Laboratorium des Instituts.



jede dieser Skalen sind zwei Kamerasysteme vorhanden, die in den zwei Wellenlängenbereichen von 1 bis 2.5 μm sowie von 2 bis 5 μm arbeiten. Das Bildfeld besitzt je nach gewählter Variante eine Ausdehnung zwischen 14" \times 14" und 56" \times 56" und bei geringster Auflösung 73" Durchmesser.

CONICA ist ein multifunktionales Instrument mit einem Fabry-Pérot-Interferometer (2 bis 2.5 μm), 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.

Im Berichtsjahr wurde die Infrarotkamera für die adaptive Optik so weit fertiggestellt, dass der endgültige InSb-Detektor (Aladdin) montiert und mit den abschließenden optischen Tests begonnen werden konnte (Abb. III.6). Zu diesem Zweck werden alle Moden des Instruments einer eingehenden optischen und mechanischen Prüfung unterzogen. Außerdem wurde die Software für die Instrumentenkontrolle fertiggestellt. Die Übergabe an die ESO ist für Sommer 2000 vorgesehen. Dann wird CONICA dem französischen Konsortium überstellt, das die zugehörige adaptive Optik entwickelt. Ein erster gemeinsamer Test ist für Herbst 2000 vorgesehen.

MIDI – Infrarotinterferometer für das VLT

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

Eins von drei Interferometern, genannt MIDI, wird unter der Federführung des MPIA entwickelt und gebaut. Beteiligt sind auch Kollegen aus den Niederlanden und Frankreich sowie vom Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg und von der Thüringischen Landessternwarte Tautenburg. MIDI soll Interferometrie mit zwei Teleskopen bei 10 μm Wellenlänge ermöglichen und wird in puncto räumlicher Auflösung einen Quantensprung in der astrophysikalischen Forschung bedeuten. 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.

Die Weglängen der von den Einzelteleskopen kommenden Strahlenbündel müssen in der gemeinsamen Bildebe-

ne bis auf Bruchteile einer Wellenlänge genau, also etwa ein Mikrometer, übereinstimmen. Die hauptsächlich geometrisch bedingte Weglängendifferenz wird bereits zu einem großen Teil ausgeglichen sein, bevor die Strahlen in das Instrument eintreten. Im Innern von MIDI wird die restliche Weglängendifferenz durch piezoelektrisch betriebene, verschiebbare Spiegel ausgeglichen. Ein Strahlteiler vereint die Strahlen zum Interferenzbild. Gleichzeitig müssen aber auch durch Luftunruhe oder Wolken hervorgerufene Helligkeitsschwankungen des beobachteten Himmelsobjekts gemessen werden. Aus diesem Grunde wird ein Teil der beiden Strahlen aus dem interferometrischen Strahlengang herausgeleitet, so dass die Helligkeit ständig separat gemessen werden kann.

Im Berichtsjahr wurde mit der Herstellung des Instruments begonnen. Ende Juli fand das »Final Design Review« für die Optik bei ESO statt und konnte ohne Schwierigkeiten abgeschlossen werden. Zum Jahresende liefen die Vorbereitungen für das Final Design Review für den Rest des Instrumentes, das für Februar 2000 geplant ist.

Am Partnerinstitut NFRA in Dwingeloo wurde mit der Konstruktion der gekühlten Optik begonnen (Abb. III.7). Hier wurde für die Entwicklung der Verstellmechanismen, deren Genauigkeit kritisch für die Strahlvereinigung ist, ein Prototyp hergestellt und erfolgreich getestet: Der Entwurf des nicht gekühlten Teils der Optik wurde abgeschlossen und gemeinsam mit Kollegen des Kiepenheuer-Instituts optimiert. Auch die Piezomotoren für die interne Weglängenverstellung wurden erfolgreich getestet: Schnelligkeit, Stabilität und Genauigkeit erreichten oder übertrafen die erforderlichen Werte. Die Spezifikationen für das empfindlichste optische Teil des Instruments, den Strahlvereiniger, konnten verifiziert werden und der Auftrag an die Firma Präzisionsoptik Gera wurde erteilt.

Der Detektor, ein Si:As-IBC-Array (IBC = impurity band conduction) mit 320 \times 240 Pixel wurde bei der Fir-

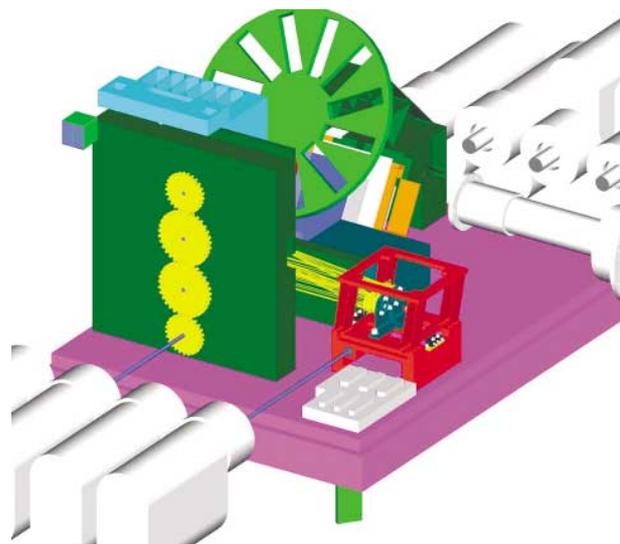


Abb. III.7: Entwurf für die Mechanik für den kalten Bereich der Optik mit verschiedenen Verstelleinheiten.

ma Raytheon in Auftrag gegeben. Ein erstes Exemplar in Testqualität wurde bereits geliefert. Die Arbeiten an der Ausleseelektronik wurden fortgeführt. Darüber hinaus wurde ein Test-Dewar hergestellt, um Temperaturverhalten und Vibrationsempfindlichkeit unter möglichst realistischen Bedingungen zu untersuchen. Dabei zeigte sich, dass mit der vorgesehenen Anordnung von Kühler und Instrument auf getrennten schweren Tischen die gefürchteten Schwingungen auf ein erträgliches Maß reduziert werden können. Der endgültige Cryostat wurde entworfen, der Aufbau der Eichquellen für Labortests ist im Gange. Auch die Arbeiten an der Software für das Instrument haben in größerem Umfang begonnen, für die Instrumentenkontrolle in Heidelberg und für die Datenauswertung in Paris und Leiden. Die Sternwacht Leiden koordiniert diese Arbeiten.

Derzeit ist geplant, das in Heidelberg getestete Instrument im Spätherbst 2001 nach Südamerika zu verschiffen und auf dem Paranal zu montieren.

PACS – Infrarotkamera für FIRST

Im Jahre 2007 will die Europäische Weltraumbehörde ESA das Far-Infrared and Submillimeter Space Telescope, FIRST, starten. Es ist die vierte große Cornerstone-Mission der ESA. FIRST erhält einen 3,5-Meter-Spiegel und drei wissenschaftliche Instrumente, die einen Wellenlängenbereich von 60 bis 700 μm abdecken sollen. Sie werden von internationalen Wissenschaftskonsortien gebaut. FIRST schließt damit bei den großen Wellenlängen an die Domäne der Radioastronomie an. Ein Schwerpunkt des Forschungsprogramms wird in der Beobachtung von protostellaren Staubwolken und protoplanetaren Staubscheiben liegen. Gleichzeitig wird die Infrarotstrahlung sehr weit entfernter, junger Galaxien im Submillimeterbereich nachweisbar sein. Das MPIA wird sich am Bau eines der Instrumente, genannt PACS (Photoconductor Array Came-

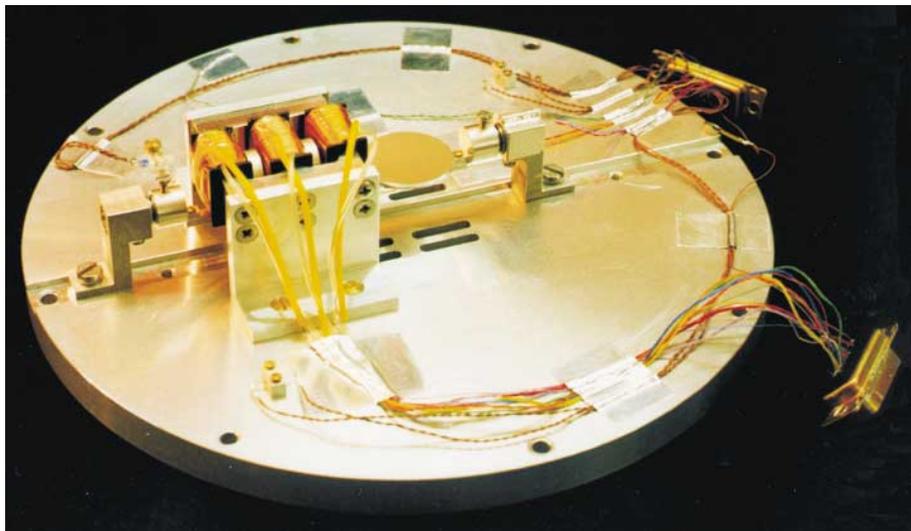
ra and Spectrometer), beteiligen. Die Projektleitung liegt beim MPI für extraterrestrische Physik in Garching (MPE).

PACS wird für photometrische und spektrometrische Untersuchungen im Wellenlängenbereich zwischen 60 und 210 μm ausgelegt. Das MPIA wird wesentlich zu der Entwicklung der Kameras und Vorverstärker sowie des Fokalebenen-Choppers und des Datenzentrums beitragen. 1999 wurde beschlossen, dass das Institut an den detaillierten Planungen zum Aufbau des FIRST-Bodensegmentes und insbesondere des Kontrollzentrums für PACS beteiligt sein wird. Basierend auf der Erfahrung mit ISO konnten wesentliche Beiträge zum Entwurf eines flexiblen Kommandosystems für die Instrumente geleistet werden. Es wurde festgelegt, dass das Institut für alle Aspekte der Kalibration von PACS während des Fluges verantwortlich sein wird.

Im Berichtsjahr bestand der wesentliche Beitrag zu PACS im Bau eines Prototypen des Choppers. Ein solches optisches Gerät 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 einer Beobachtung abwechselnd das Objekt und ein leerer Himmelsausschnitt aufgenommen. Letzteres liefert den Hintergrund, der später von der eigentlichen Aufnahme abgezogen wird. Die alternierende Beobachtung zweier Himmelsgebiete erreicht man, indem man im Strahlengang einen Spiegel anbringt, der ständig hin und her kippt (oder auf englisch: choppt).

Der Hauptspiegel von FIRST wird voraussichtlich eine Temperatur um 90 K besitzen, so dass ab etwa 50 μm Wellenlänge mit erheblicher Wärmestrahlung zu rechnen ist.

Abb. III.8: Der Prototyp des PACS-Choppers mit einem 25 mm großen Spiegel. In jedem Luftspalt arbeiten zwei Halbleiterplatten (Feldplatten) aus InSb/NiSb als Positionssensoren.



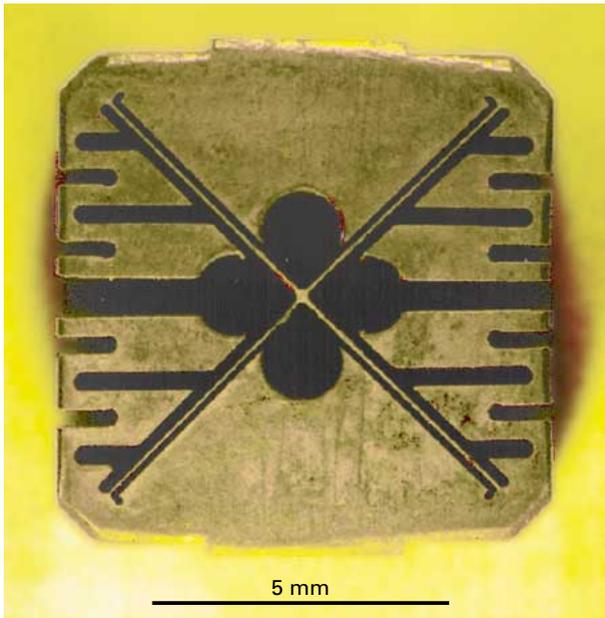


Abb. III.9: Prototyp eines Kreuzfedergelenks auf dem die Chopperachse gelagert wird.

Dem Chopper wird somit bei Beobachtungen in diesem Wellenlängenbereich eine wesentliche Bedeutung zukommen. Bereits bei ISO konnte das Institut Erfahrung mit Chopperrn bei sehr tiefen Temperaturen sammeln, wo die meisten herkömmlichen Materialien und technischen Systeme versagen: Im Verlauf von über tausend Stunden wurden mehrere Millionen Kippzyklen ohne Materialermüdung ausgeführt.

Bei PACS sind die Anforderungen noch größer: Bei einer Temperatur von 4 K sollen 630 Millionen Zyklen möglich sein. Der Spiegel besitzt einen Durchmesser von 25 Millimetern und muss über einen Winkel von neun Grad schwenkbar sein. Außerdem muss er das Licht von zwei internen Kalibrierquellen auf die Detektoren lenken. Am Institut entschied man sich für einen elektromagnetischen Antrieb des Choppers, der so wenig bewegliche mechanische Komponenten wie möglich enthält und kaum Wärme erzeugt.

Der Antrieb besteht aus drei parallel liegenden Kernen aus Cryoperm (Abb. III.8). Diese drei Metallkerne sind von Spulen umwickelt, die in den zwei Luftspalten jeweils ein Magnetfeld erzeugen. Legt man an den Spulen eine Wechselspannung an, so entsteht im Luftspalt eine Lorentz-Kraft, die zwei Antriebsmagnete hin und her bewegt. Diese Linearbewegung wird durch Gelenke auf eine Achse übertragen und dadurch in eine Drehbewegung umgesetzt. Auf dieser Achse sitzt der Chopper-Spiegel.

Die Achse selbst ist auf so genannten Kreuzfedergelenken gelagert, die verschleißfrei und gänzlich ohne Schmiermittel auch noch bei tiefen Temperaturen funktionieren (Abb. III.9). Sie bestehen aus zwei kreuzförmig angeordneten, flexiblen Blattfedern. Dreht sich die Achse so, werden diese Blätter in ihrer Form s-förmig verbogen. We-

gen ihrer hohen Elastizität sind Achsendrehungen bis zu 9 Grad möglich.

Der im Labor gefertigte Prototyp konnte die prinzipielle Tauglichkeit dieses Systems bereits eindrucksvoll demonstrieren. Zudem deuten Computersimulationen darauf hin, dass sich auch die von der ESA vorgegebene Verlustleistung von maximal 4 mW erreichen lassen wird. Um die ohmsche Verlustwärme der Antriebspulen zu minimieren, wurden am Institut unterschiedliche, für die Kryomechanik geeignete, elektrisch hochleitende Materialien, wie Silber, Aluminium und Kupfer mit außergewöhnlichen Reinheitsgraden um 99.999 %, und Supraleiter untersucht.

Im Berichtsjahr wurden schließlich drei Industrieangebote zum Bau des Flugmodell-Choppers sowie eines Lebensdauer-, Qualifikations- und Flugersatzmodells eingeholt und ein Vertragsabschluss vorbereitet.

Ein neuer Sekundärspiegel für das UKIRT

Seit Jahren schon ist das Institut am United Kingdom Infrared Telescope beteiligt (s. Kapitel I). Vor einigen Jahren wurde beschlossen, das Teleskop gemeinsam mit dem Royal Observatory in Edinburgh, Schottland, technisch zu verbessern. Im Rahmen dieser Vereinbarung übernahm das MPIA den Bau einer kompletten Tip-Tilt-Sekundärspiegeleinheit, einschließlich eines neuen Frontringes für Beobachtungen im Infraroten. 1996 lieferte das Institut ein solches System auf den Mauna Kea, Hawaii. Im Berichtsjahr wurde ein neuer Sekundärspiegel mit einer weiter verbesserten Oberfläche hergestellt. Mit ihm wird seitdem am UKIRT die theoretisch mögliche Auflösung erreicht.

Die Sekundärspiegeleinheit kann gleichzeitig drei verschiedene Aufgaben übernehmen. Zum einen ist der Spiegel mit einer Hexapodmontierung an dem Frontring montiert. Dadurch ist er langsam (mit Frequenzen von maximal einem Hertz) beweglich. Dieses aktive optische System ermöglicht es, während der Beobachtung den Spiegel in jeder Lage optimal zu justieren und Fokussierfehler auszugleichen.

Zum zweiten ist der Spiegel auf einer Plattform montiert, die sich über Piezokristalle sehr schnell (mit Frequenzen bis zu 220 Hertz) verkippen lässt. Hiermit lassen sich Verkippen der eintreffenden Wellenfront, hervorgerufen durch Turbulenzen in der Atmosphäre, während der Belichtung adaptiv korrigieren (s.a. den Beitrag über ALFA auf Seite 31). Gleichzeitig übernimmt die Piezo-Plattform bei Beobachtungen im mittleren Infraroten die oben bereits beschriebene Funktion des Choppers.

Da der Spiegel mit einem Durchmesser von 31 Zentimetern in manchen Beobachtungsmoden sehr schnell hin und her bewegt wird, musste eine spezielle Leichtbauweise gewählt werden: Aus dem massiven Spiegelrohling aus der Glaskeramik Zerodur wurde ein Wabenmuster herausgearbeitet. Die übrig bleibenden Wabenwände und der scheibenförmige Spiegelträger waren anschließend jeweils nur 4.5 Millimeter dünn. Dadurch ließ sich das Ge-



Abb. III.10: Die Rückseite des Sekundärspiegels. Man erkennt die gewichtsmindernde Wabenstruktur.

wicht von 5.5 Kilogramm auf 2 Kilogramm reduzieren (Abb. III.10).

Das System arbeitet seit 1996 sehr erfolgreich. Um aber die angestrebte maximal mögliche Auflösung (Beugungsgrenze) von 0.3 Bogensekunden bei 2.2 μm Wellenlänge

zu erreichen, mussten die maximalen Anweichungen der Fläche des Sekundärspiegels von der Sollform gringer als 125 nm sein. Dies war beim ersten Spiegel nicht ganz der Fall gewesen, weil beim mechanischen Abtragen der Waben in der Oberfläche der Glaskeramik scharfe Kanten oder Mikrorisse entstanden waren, die zu lokalen Spannungen im Material geführt hatten, und die Wabenstruktur hatte sich geringfügig in der Spiegeloberfläche abgedrückt.

Für den zweiten Spiegel wurde jetzt ein von der Firma Carl Zeiss in Oberkochen entwickeltes Verfahren angewandt: Auf die Rückseite des Spiegelträgers wurde durch Aufbringen einer aggressiven Säure eine 0.2 mm dünne Schicht abgetragen. Dadurch verschwanden sämtliche Mikrorisse und die Spannungen im Material, und infolgedessen war auch von der Wabenstruktur auf der Spiegeloberfläche keine Spur mehr zu sehen. Die gesamte Oberfläche des Sekundärspiegels wich nur noch maximal 110 nm von der Idealform ab. Der Erfolg war so überzeugend, dass demnächst auch der erste Sekundärspiegel mit dem neuen Ätzverfahren nachbehandelt werden soll.

IV Wissenschaftliche Arbeiten

IV.1 Galaktische Astronomie

Staub um junge massereiche Sterne – Hüllen oder Scheiben?

Zirkumstellare Scheiben aus Gas und Staub spielen bei vielen astrophysikalischen Vorgängen eine entscheidende Rolle. Junge, sonnenähnliche Sterne, so genannte T-Tauri-Sterne, sind von solchen Scheiben umgeben, in denen später wahrscheinlich Planeten entstehen. Weniger klar ist die Situation bei massereicheren Sternen, die nach ihrem Entdecker Herbig-Ae/Be-Sterne heißen. Auch sie zeigen eine Reihe von Phänomenen, die mit der Existenz von Scheiben in Verbindung gebracht werden. Unter anderem wurde bei einigen von ihnen intensive Infrarotstrahlung gefunden, die von dichtem zirkumstellarem Staub stammen muss. Mit dem Infrarotobservatorium ISO ist es nun gelungen, sieben Herbig-Ae/Be-Sterne gleichzeitig im mittleren und fernen Infrarot zu beobachten. Sie zeigten in fast allen Fällen Strahlungsverteilungen, die für zirkumstellare Scheiben charakteristisch sind.

Als Herbig-Ae/Be-Sterne bezeichnet man die jungen Vorläufer der späteren A- und B-Sterne. Ihre Massen liegen im Bereich von etwa zwei bis acht Sonnenmassen. Die Spektren dieser Vorhauptreihensterne zeigen starke Emissionslinien. Die Sterne befinden sich fast immer in der Dunkelwolke, in der sie entstanden sind, und sind von Reflexionsnebeln umgeben. Zudem ließ sich bei den Herbig-Ae/Be-Sternen ein schneller Teilchenwind nachweisen. In einigen Fällen ist die Ausströmung bipolar, teilweise sogar in Form eng gebündelter Teilchenstrahlen, so genannter Jets. In diesen Fällen geht man davon aus, dass der Teilchenwind den Stern senkrecht zu einer nicht direkt sichtbaren zirkumstellaren Scheibe verlässt.

Starke Hinweise auf zwei Scheiben, die beide Komponenten des Herbig-Ae/Be-Doppelsterns Z Canis Majoris umgeben, fanden Astronomen des Instituts kürzlich mit Speckle-Infrarotpolarimetrie (s. Jahresbericht 1998, S. 16). Die Radien dieser Scheiben müssen weniger als 100 AE betragen. Amerikanische Astronomen beobachteten 1997 einige Herbig-Ae-Sterne mit hochauflösender Interferometrie im Millimeterbereich, wo sich Kohlenmonoxid nachweisen lässt. Bei einigen Sternen fanden sich ausgedehnte Hüllen mit Gesamtmassen (Staub und Gas) zwischen 0.005 bis 0.034 Sonnenmassen, entsprechend 5 bis 34 Jupitermassen. Bei dem Stern AB Aurigae zeigte sich in der Emission von Koh-

lenmonoxidgas eine ellipsoidförmige Hülle mit einer großen Halbachse von 450 AE, deren Radialgeschwindigkeitsfeld sich am einfachsten mit einer rotierenden Scheibe erklären lässt (Abb. IV.1).

Die mit ISO beobachteten Herbig-Ae/Be-Sterne befinden sich in Entfernungen zwischen 2000 und 7000 Lichtjahren. Sind deren vermutete Scheiben etwa so groß wie diejenige von AB Aurigae, so haben sie eine Winkelausdehnung um eine Bogensekunde und sind somit mit ISO räumlich nicht auflösbar. Alle Informationen müssen demnach aus der spektralen Energieverteilung des thermisch strahlenden Staubes kommen.

Mit ISO bot sich nun die Gelegenheit, einige Herbig-Ae/Be-Sterne auch im fernen Infrarot zu beobachten, wo kühlerer Staub aus den Außenbereichen der Hüllen oder Scheiben strahlt und wo die gesamte Strahlungsverteilung ihr Maximum hat. Außerdem war es erstmals möglich, die Infrarotstrahlung gleichzeitig über einen großen Wellenlängenbereich hinweg zu messen. Insgesamt konnten

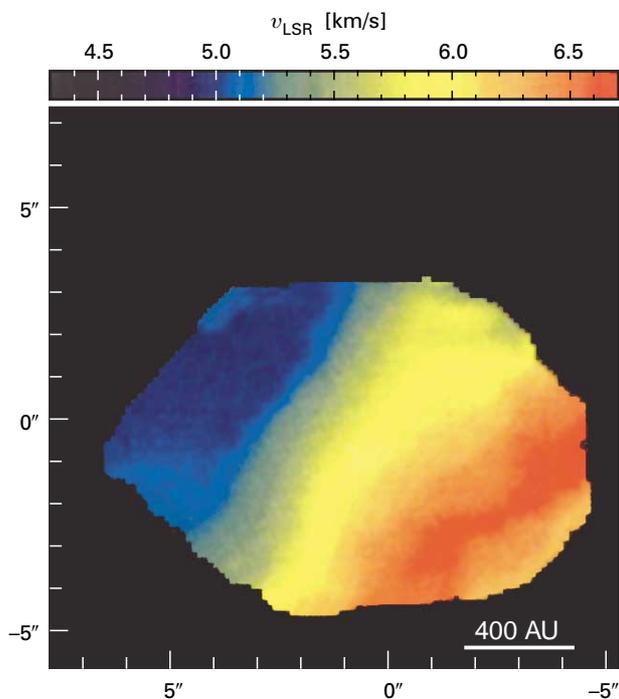


Abb. IV.1: Die Verteilung von Kohlenmonoxid in der mutmaßlichen Scheibe um AB Aurigae. Das Geschwindigkeitsfeld ist farblich kodiert: Blaue Bereiche bewegen sich auf uns zu, rote von uns fort. (Mannings, Sargent, CIT)

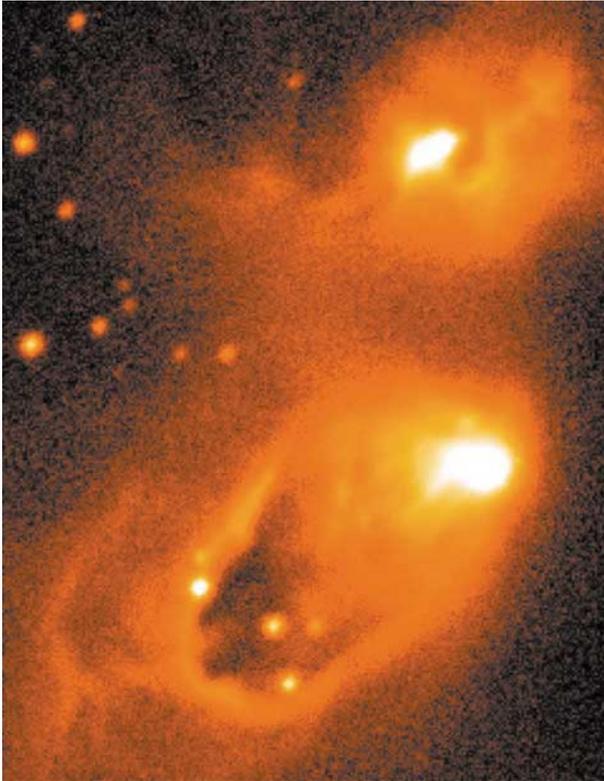
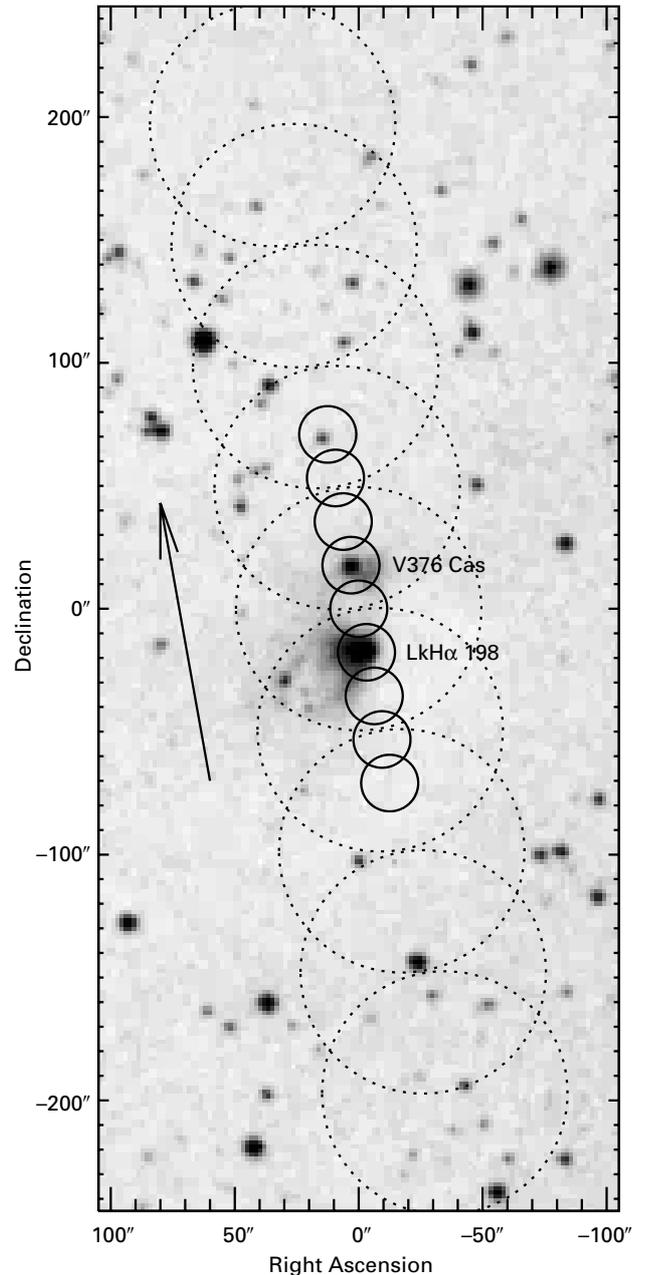


Abb. IV.2: Oben: Diese optische Aufnahme von LkH α 198 zeigt den Reflexionsnebel. **Rechts:** Die Positionen der ISOPHOT-Beobachtungsblenden im Gebiet um LkH α 198 und V 376 Cas in der Dunkelwolke Lynds 1265. (Bild: Tom Ray, Dublin)

Astronomen des MPIA zusammen mit Kollegen von der Universitätssternwarte Jena sieben Herbig-Ae/Be-Sterne im Wellenlängenbereich von 5 bis 200 μm untersuchen.

Wie schwierig diese Untersuchungen waren, lässt sich an dem Beispiel der beiden 2000 Lichtjahre entfernten Sterne LkH α 198 und V 376 Cas exemplarisch demonstrieren. Die beiden Sterne stehen nur eine halbe Bogenminute voneinander entfernt in der selben Dunkelwolke, in der sie auch etwa gleichzeitig entstanden sein dürften. Verschiedene Beobachtungen, unter anderem auch von Mitarbeitern des MPIA, hatten ergeben, dass beide Sterne vermutlich von Scheiben umgeben sind. Bei LkH α 198 ließ sich sogar ein Jet nachweisen – ein starker Hinweis auf eine Scheibe. Dennoch blieb eine letzte Bestätigung aus. Die Situation wird durch zwei weitere Quellen kompliziert, die nur im Infraroten erkennbar sind. Eine liegt 6 Bogensekunden nördlich von LkH α 198. Vermutlich handelt es sich ebenfalls um einen Herbig-Ae/Be-Stern. Er steckt so tief im Innern der Wolke, dass der Staub das Sternlicht im sichtbaren Bereich um etwa 35 Größenklassen, entsprechend einen Faktor 10^{14} abschwächt. Zudem gibt es 19 Bogensekunden nordwestlich ein weiteres Objekt. Es ist so kühl, dass es erst bei Wellenlängen um 1 mm auftaucht.

Wie Abb. IV.2 zeigt, wurde mit ISOPHOT ein Scan über beide Objekte gelegt, wobei der Blendendurchmes-

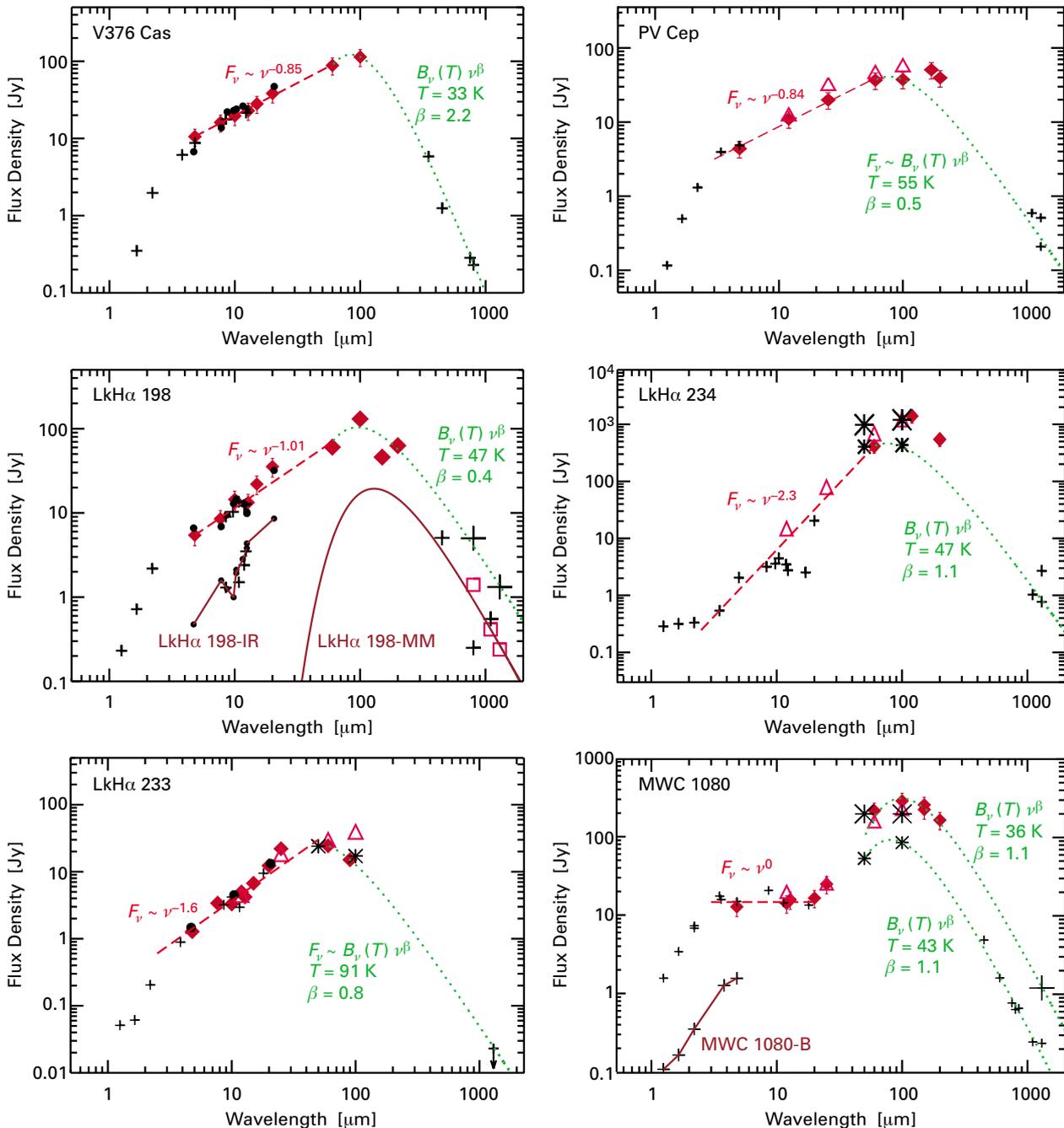


ser bei Wellenlängen von 5 bis 20 μm 23 Bogensekunden (durchgezogene Kreise) betrug. Hier waren LkH α 198 und V 376 Cas einzeln auflösbar. Bei 60 und 100 μm hatte die Blende einen Durchmesser von 99 Bogensekunden (gestrichelte Kreise). Hier musste zunächst eine flächige Hintergrundemission der Dunkelwolke abgezogen werden, bevor sich die beiden Quellen durch eine Verteilungsfunktion beschreiben ließen. Bei 150 und 200 μm Wellenlänge entspricht ein Pixel einer Winkelauflösung von 90 Bogensekunden. Auch hier musste eine intensive Hintergrundemission abgezogen werden, aber die Auflösung reicht hier nicht aus, um die Quellen zu trennen. Zudem tritt hier wahrscheinlich auch die 19 Bogensekunden nordwestlich gelegene Submillimeterquelle auf.

Aus diesen Daten ließen sich die spektralen Energieverteilungen der beiden Herbig-Ae/Be-Sterne erstellen (Abb. IV.3). Bei V 376 Cas steigt die Intensität zum fernen Infrarot an und erreicht ein Maximum bei etwa 100 μm . Diese breite Energieverteilung entsteht durch die Emission von Staub mit unterschiedlichen Temperaturen. Aus den neuen ISO-Daten lässt sich nun ableiten, dass der kühle Staub in großer Entfernung vom Stern eine Temperatur um 33 K haben muss. Die Gesamtleuchtkraft im Bereich von 1 bis 1000 μm ergibt sich zu 430 Sonnenleuchtkräfte. Da mit ISOPHOT erstmals das komplette Spektrum zwischen 16 und 100 μm abgedeckt werden konnte, bedeutet dies die erste zuverlässige Leuchtkraftbestimmung.

Interessanterweise lässt sich der Anstieg der Emission bis zu 100 μm durch ein Potenzgesetz beschreiben, das demjenigen von Staubscheiben um sonnenähnliche T-Tauri-Sterne sehr stark ähnelt. In diesem Fall stammt die Emission im nahen und mittleren Infrarot aus dem inneren Bereich der Scheibe, wobei das Potenzgesetz darauf hin-

Abb. IV.3: Die spektralen Energieverteilungen der sechs Herbig-Ae/Be-Sterne. Bei LkH α 198 wurden die Beiträge von zwei nahen Begleitern berücksichtigt. Bei MWC 1080 kommen wahrscheinlich im fernen Infraroten erhebliche Strahlungsanteile einer ausgedehnten Quelle hinzu, die vermutlich mit dem Stern nicht in ursächlicher Verbindung sind.



deutet, dass die Materie dort optisch dick ist. Das Maximum um $100\ \mu\text{m}$ kennzeichnet dann jenen Bereich in der Scheibe, wo der Staub kühler und optisch dünn wird. Mit dieser Energieverteilung lässt sich zwar die Existenz einer Scheibe um V 376 Cas nicht beweisen, sie ist aber ein Indiz dafür.

Bei LkH α 198 liegt der Fall komplizierter, weil dort mit zunehmender Wellenlänge die nahe gelegenen Infrarotquellen immer stärker zum Signal beitragen. Die drei anfangs erwähnten Sterne lassen sich aber nicht trennen. Zieht man jedoch weitere Beobachtungsdaten mit hinzu, so ist es möglich, ansatzweise die gemessene Intensitätsverteilung durch drei Planck-Kurven zu beschreiben (Abb. IV.3). Somit findet man auch für LkH α 198 einen Intensitätsverlauf, der sich bis zum Maximum durch ein Potenzgesetz beschreiben lässt. Hier ergibt sich die beste Anpassung der Temperatur des kühlen Staubes zu 47 K, und die Gesamtleuchtkraft im Bereich von 1 bis $1000\ \mu\text{m}$ liegt zwischen 60 und 350 Sonnenleuchtkräften. Der Wert ist wegen der Kontamination durch die beiden benachbarten Quellen unsicher.

Auf ähnliche Weise wurden die anderen Herbig-Ae/Be-Sterne analysiert. Die Temperaturen betragen im Mittel 50 K und liegen damit im Bereich der Staubscheiben um T-Tauri-Sterne. Sie sind niedriger als bei den Scheiben der Sterne vom »Wega-Typ« (s. »Das Alter der Scheibensterne Wega, Fomalhaut und Beta Pictoris«, S. 53). Diese liegen bei 60–120 K. Auch die für die anderen Herbig-Ae/Be-Sterne abgeleiteten Potenzgesetze ähneln denen von T-Tauri-Sternen.

Letztlich lassen sich die beobachteten Spektralverteilungen der Herbig-Ae/Be-Sterne zwar mit der Existenz von Staubscheiben erklären. Die Interpretation ist jedoch nicht eindeutig. Die Beobachtungsdaten passen ebenso zu Modellen mit sphärischen Staubhüllen wie zu Modellen, in denen eine Scheibe von einer weit ausgehenden Hülle umgeben ist. Dennoch sind die ISO-Daten ein bedeutender Beitrag zum Gesamtkomplex der Sternentstehung. Denn erstmals konnte der Spektralverlauf dieser jungen Sterne in dem bislang unerschlossenen Bereich um das Maximum herum beobachtet werden. Hieraus ergaben sich die Temperaturen in den kühlen Bereichen der Hüllen oder Scheiben, und es ließen sich zuverlässige Werte für die Gesamtleuchtkraft der Staubhüllen ableiten. Dies alles sind wertvolle physikalische Größen, welche in die theoretischen Modelle eingehen. Der bedeutende Fortschritt gegenüber IRAS besteht neben dem erweiterten Wellenlängenbereich auch in einer wesentlich höheren Empfindlichkeit und in den Möglichkeiten der Spektroskopie. Angesichts der Tatsache, dass erst 15 Prozent der gesamten ISO-Daten ausgewertet sind, erwarten die Astronomen noch viele weitere Ergebnisse von dieser erfolgreichen Mission.

Für die fernere Zukunft hoffen die Forscher auf das flugzeuggetragene Teleskop SOFIA und die nächste große europäische Satellitenmission FIRST, an der das Institut wieder beteiligt sein wird (s. Kapitel III).

Junge Planeten auf Wanderschaft

Ende 1995 entdeckten zwei schweizer Astronomen den ersten extrasolaren Planeten. Bis Mitte 2000 waren mehr als 40 dunkle Begleiter sonnenähnlicher Sterne bekannt. Fast alle diese Planeten sind mindestens so massereich wie Jupiter und umkreisen den Stern in Abständen von weniger als einer Astronomischen Einheit. Dies steht im Widerspruch zur bisherigen Lehrmeinung, wonach sich jupiterähnliche Planeten erst in Abständen von mindestens 4 AE vom Stern bilden können. Mit Hilfe von Computersimulationen konnten Theoretiker des Instituts demonstrieren, dass massereiche Protoplaneten durch Wechselwirkung mit der Gas-/Staubscheibe, in der sie entstanden sind, Drehimpuls verlieren und sich dadurch dem Zentralstern auf einer spiralförmigen Bahn nähern.

Die extrasolaren Planeten stehen am Himmel so nahe an ihrem Zentralstern und sind so lichtschwach, dass sie sich nicht direkt beobachten lassen. Bislang sind sie nur indirekt über ihre Schwerkraftwirkung auf den Stern nachweisbar: Planet und Stern kreisen um einen gemeinsamen Schwerpunkt, der etwas außerhalb des Sternzentrums liegt (Abb. IV.4); dies bewirkt, dass der Stern mit der Umlaufperiode des Planeten hin und her pendelt. Mit hochauflösenden Spektrographen ist es möglich, die radiale (in Richtung des Sehstrahls liegende) Bewegungskomponente bis auf einige Meter pro Sekunde genau zu messen.

Aus der Masse des Sterns und der beobachteten Periode und Amplitude seines Umlaufs um den Schwerpunkt des Systems lassen sich die Massen und Bahnradien der Planeten errechnen. Allerdings ergeben sich für die Massenwerte nur untere Grenzen, da man die räumliche Lage der Umlaufbahn nicht kennt. Liegt sie senkrecht zur Himmelsebene, so wird der Stern ausschließlich in radialer Richtung ausgelenkt, und der ermittelte Massenwert stimmt exakt. In allen anderen Fällen besitzt die Sternbewegung auch eine nicht erfasste Komponente in der Himmelsebene, so dass die tatsächliche Planetenmasse größer ist als die aus der Radialbewegung abgeleitete.

Die bisherigen Werte zeigen aber eindeutig, dass es sich in den meisten Fällen tatsächlich um Planeten handelt, deren Masse ein Vielfaches der Masse Jupiters beträgt. Körper mit mehr als etwa 13 Jupitermassen sind Braune Zwerge (s. »Vom massearmen Stern zum Braunen Zwerg«, S. 46). Die bisher ermittelten unteren Grenzen der Massenwerte extrasolarer Planeten liegen zwischen 0.34 und 13 Jupitermassen. Nur im Fall des Sterns HD 209458, in dem der Planet aus unserer Sicht vor dem Stern vorbeizieht, konnte die Masse des Planeten zu genau 0.7 Jupitermassen und sein Radius zu 1.5 Jupiterradien bestimmt werden. Die Trabanten halten sich in einem Abstand von 0.04 bis 2.5 AE von ihrem Zentralstern auf, und die Exzentrizität ihrer Bahnen liegt zwischen 0 (kreisförmig) und 0.67 (langgestreckte Ellipse). Alle Planeten befinden sich dem-

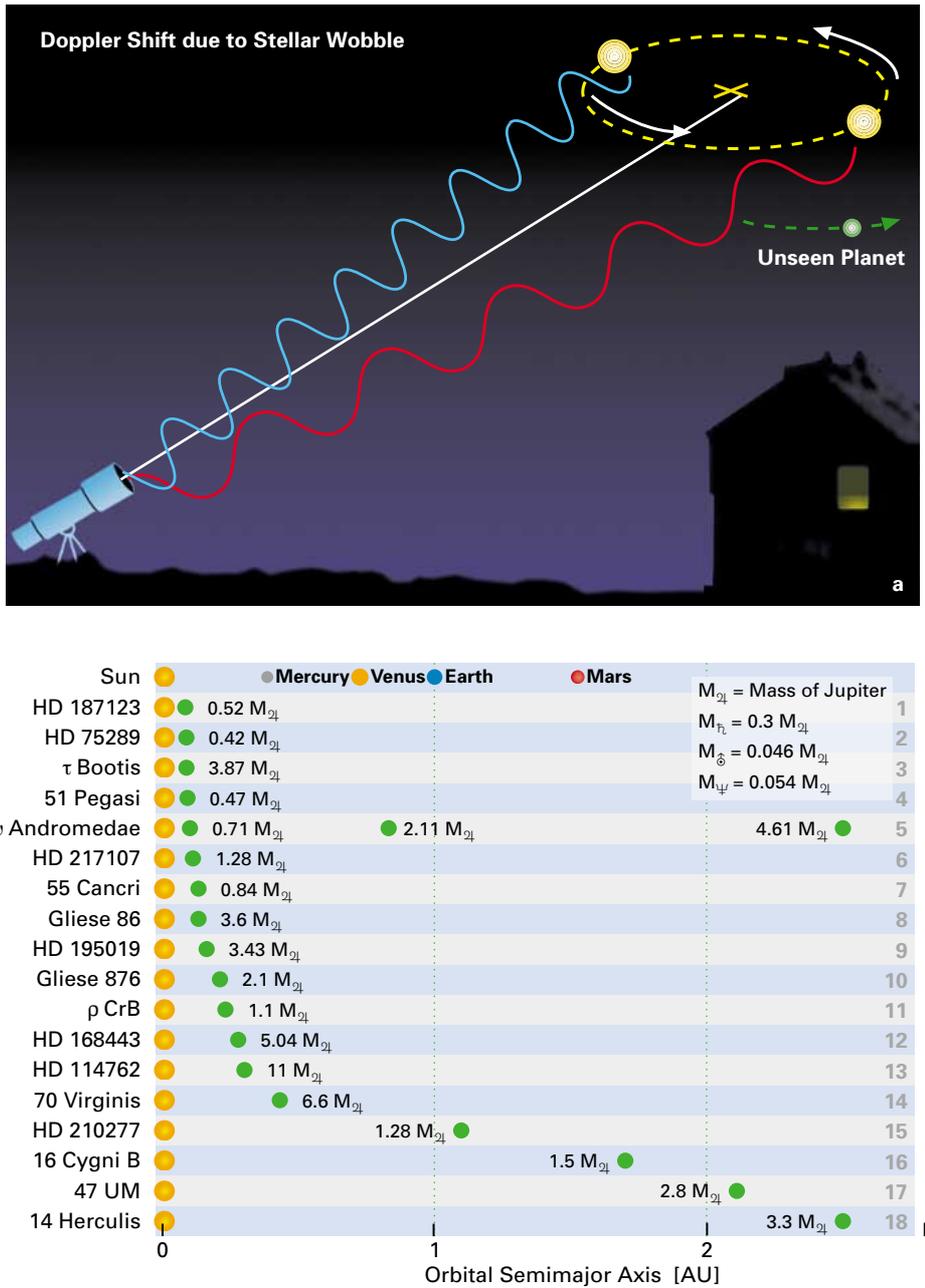


Abb. IV.4: (a) Ein Stern, der von einem Planeten umkreist wird, führt am Himmel eine Pendelbewegung aus, die sich im Spektrum als Doppler-Verschiebung äußert. (b) Die bislang bekannten extrasolaren Planeten sind näher am Stern als erwartet.

nach näher an ihrem Zentralstern, als man es nach den heutigen Theorien der Planetenentstehung erwartet.

Planeten jenseits der Schneegrenze

Planeten bilden sich in zirkumstellaren Scheiben aus Gas und Staub. Während sich die Materie im Zentrum zu einem Stern verdichtet, klumpt sie sich in den Außenbe-

reichen zu Planeten zusammen. Dieser Vorgang läuft nach heutigen Vorstellungen in mehreren Stufen ab. Zunächst sind Staub und Gas vermischt, und die festen Partikel wachsen weiter an, indem sie zusammenstoßen und aneinander haften bleiben. Die auf diese Weise immer schwerer werdenden Teilchen sinken nun aufgrund der Schwerkraft zur Mittelebene der Scheibe ab und bilden dort eine verhältnismäßig dünne Staubscheibe. Da durch diesen Prozess die Staumdichte zugenommen hat, stoßen die Teilchen jetzt öfter zusammen und wachsen weiter bis zu einigen Kilometern Durchmesser an. Man bezeichnet diesen Vorgang als Koagulation. Die Planetesimale wachsen schließlich durch Zusammenstöße aufgrund gravitativer Wechselwirkungen zu Objekten bis zu einer Größe von etwa zehn Erdmassen an. Die Gravi-

tation dieser so entstandenen Körper ist nun groß genug, um aus der Umgebung weitere Materie, vor allem Gas, anzuziehen (zu akkretieren) und an sich zu binden.

In einer Entfernung von etwa 5 Astronomischen Einheiten (AE) vom Stern dauert es einige hunderttausend bis eine Million Jahre, bis sich ein Planet von der Größe Jupiters gebildet hat. Dies liegt innerhalb der Lebensdauer der protoplanetaren Scheiben, die aus Beobachtungen zu mehreren Millionen Jahren ermittelt werden konnte. An diesen Ergebnissen waren Astronomen des MPIA maßgeblich beteiligt (s. Jahresbericht 1998, S. 11). Die aus der Theorie abgeleitete Zeitspanne der Planetenbildung liegt demnach innerhalb der empirisch ermittelten Lebensdauer der Scheiben – das zeigt, dass unser Verständnis der Planetenentstehung schon recht vollständig ist. Allerdings gibt es noch ein Problem.

Modellrechnungen zufolge entsteht ein jupiterähnlicher Gasplanet, indem sich zunächst ein fester Gesteinskern von etwa 10 bis 15 Erdmassen bildet. Dieser sammelt aus der Umgebung Gas auf und umgibt sich mit einer Atmosphäre. Dieser Vorgang muss offenbar einsetzen, bevor das Gas aus der Scheibe verschwunden ist, also innerhalb von etwa 10^7 Jahren. In geringen Abständen vom Stern reichen allerdings weder die Zeit noch die Materiemenge in der Scheibe aus, damit sich so massereiche Kerne der späteren Gasplaneten bilden können. Dies ist erst in mindestens 4 AE Entfernung vom Stern möglich, jenseits des so genannten Eiskondensationsradius, auch Schneegrenze genannt. Dort ist die Temperatur so niedrig, dass leicht flüchtige Gase zu Eis auskondensieren. Die Entstehung dieser festen Teilchen aus der Gasphase erhöht die Koagulationsrate, so dass sich die massereichen Kerne als Vorläufer der Gasplaneten schneller bilden als ohne diesen Vorgang.

Diese Theorie steht zunächst im Widerspruch zu den Beobachtungen extrasolarer Planeten. Dieser Widerspruch ließe sich lösen, wenn man einen Mechanismus fände, auf Grund dessen Planeten aus einer größeren Entfernung zum Stern hinwandern. Hier kommt eine Wechselwirkung des Protoplaneten mit der Staubscheibe in Frage, durch die der Körper einen Teil seines Bahndrehimpuls verliert.

Wie ein Planet Drehimpuls verliert

Schon frühere Rechnungen hatten gezeigt, dass das Gravitationsfeld des Planeten in die zirkumstellare Staubscheibe eine Störung einbringt, die zur Ausbildung von spiralförmigen Dichtewellen führt. Sie erinnern an die Arme von Spiralgalaxien.

Außerdem kommt es zu einem interessanten Austausch von Drehimpuls zwischen der Scheibe und dem Planeten. Die Teilchen innerhalb der Planetenbahn bewegen sich schneller um den Stern herum als der Planet. Er bremst sie daher mit seiner Schwerkraft ab oder, anders gesagt, die Teilchen verlieren an Drehimpuls und wandern weiter

nach innen. Die Teilchen jenseits der Planetenbahn hingegen sind langsamer als er und gewinnen von ihm Drehimpuls, wodurch sie weiter nach außen wandern. Auf diese Weise entsteht in der Scheibe entlang der Bahn des Planeten eine ringförmige Lücke.

Durch die Wechselwirkung mit der inneren Scheibe gewinnt der Planet Drehimpuls und würde dadurch nach außen wandern. Gleichzeitig verliert er Drehimpuls an die äußere Scheibe. Unter dem Strich könnten sich diese beiden Effekte aufheben. Dies ist aber nicht der Fall. In Wirklichkeit verlieren die Teilchen der inneren Scheibe an Drehimpuls und fallen in den Zentralstern hinein. Damit verringert sich die Masse der inneren Scheibe stetig, und damit ist für den Planeten der Drehimpulsverlust an die äußere Scheibe größer als der Gewinn von der inneren Scheibe. Der Planet müsste demnach nach innen wandern.

Computersimulationen sollten prüfen, ob diese qualitativen Überlegungen richtig sind. Außerdem wollte man herausfinden, in welcher Zeitspanne der Planet zum Stern hinwandert, wie sich dieser Vorgang auf die Exzentrizität der Bahn auswirkt und wie viel Materie der Planet während dieses Vorgangs aus der Scheibe aufsammelt. Es wurde davon ausgegangen, dass sich in 5 AE Entfernung vom Stern bereits ein Planet mit einer Jupitermasse gebildet hat. Innerhalb der anfänglichen Planetenbahn sollten noch zwei Jupitermassen an Materie vorhanden sein. Für die turbulente Viskosität der protoplanetaren Scheibe wurde ein typischer Wert angenommen.

Die Simulation eines solchen Systems zeigte zunächst deutlich, wie sich in der Scheibe Spiralarme bilden und dass nach etwa 200 Umläufen des Planeten, entsprechend 2000 Jahren, die Lücke in der Scheibe entstanden ist (Abb. IV.5). Eine Detailaufnahme (Abb. IV.6) verdeutlicht den Gasstrom in der Umgebung des Protoplaneten. (Hier ist darauf zu achten, dass das Bezugssystem mit dem Planeten um den Stern wandert.). Gleichzeitig wandert der Planet tatsächlich wie erwartet nach innen. Wie Abb. IV.7 (links) zeigt, ist der Planet nach etwa 2000 Umläufen um 40 % näher am Stern als zu Beginn der Simulation. Ein Großteil der inneren Scheibe ist zu diesem Zeitpunkt bereits verschwunden.

Während dieser Phase hat der Planet Scheibenmaterie aufgesammelt. Anfänglich geht dieser Vorgang rasch vonstatten, so bald sich jedoch die Lücke gebildet hat, steht dem Planeten nicht mehr so viel Material zur Verfügung. Dennoch akkretiert er bis zum Schluss weiter (Abb. IV.7, rechts). Wie zu erkennen, hat er seine Masse nach 2000 Umläufen mehr als verdoppelt.

Dieser Computerlauf wurde mit einer hohen Auflösung gerechnet, um auch die Details zuverlässig zu untersuchen. Um das Langzeitverhalten innerhalb angemessener Rechenzeiten studieren zu können, waren Rechnungen mit geringerer Auflösung nötig. Hier wurde die Zuverlässigkeit verschiedener Rechencodes getestet. Auch wurden einige physikalische Parameter, wie die Akkretionsrate des Planeten, variiert. Wenn sich im Detail auch Unterschiede zeigten, so wanderten doch in allen Fällen die Planeten

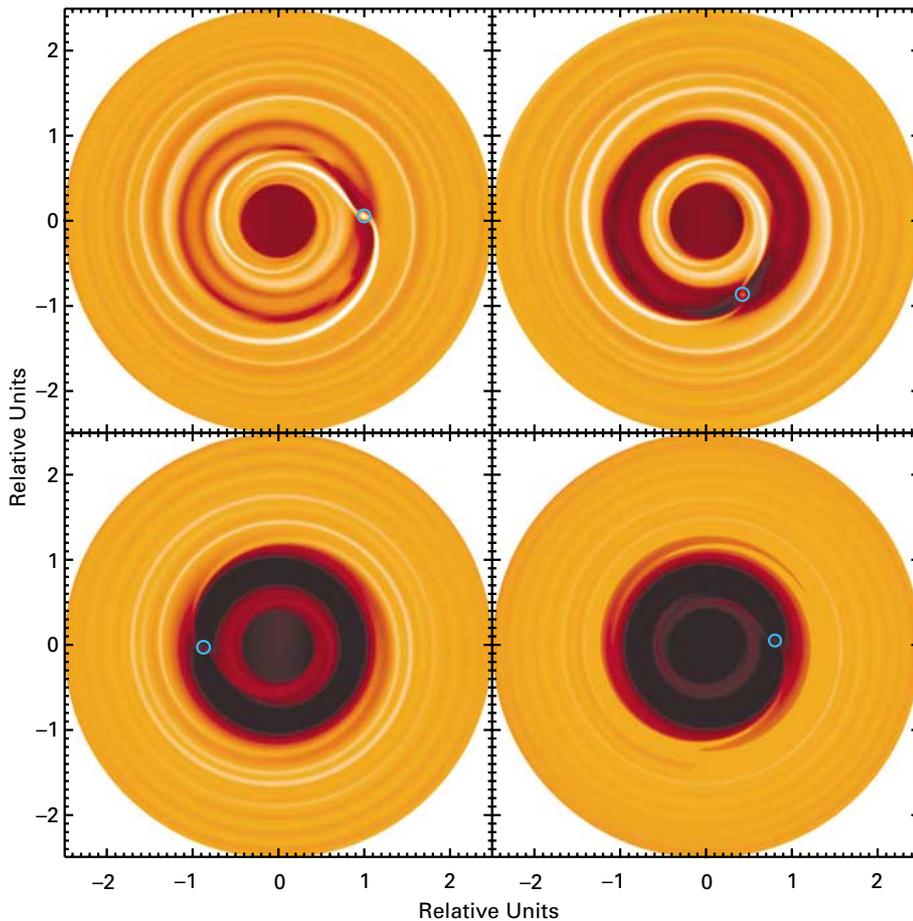


Abb. IV.5: Entwicklung eines Protoplaneten in einer zirkumstellaren Scheibe während 527 Umläufen. Der Kreis repräsentiert die Position des Protoplaneten. Bereiche niedriger Materiedichte der Scheibe sind dunkel, solche hoher Dichte hell dargestellt.

nach innen. Und in einem Zeitraum zwischen etwa 100 000 und 200 000 Jahren hatten sie den Stern erreicht und müssten – theoretisch – in ihn hineinstürzen. Damit ist die Zeitskala für die Wanderung nach innen um rund eine Größenordnung kleiner als diejenige für die Entstehung großer Gasplaneten.

Auf diese Weise lässt sich also die Existenz massereicher extrasolarer Planeten, die ihren Stern in sehr geringen Abständen umkreisen, durch die beschriebene Wanderbewegung erklären. Gleichzeitig erhebt sich die neue Frage: Wodurch wird die Wanderung gestoppt, bevor der Planet im Stern verschwindet? Hier sind mehrere Möglichkeiten denkbar.

So werden sich im allgemeinen mehr als nur ein Planet in der Scheibe befinden. Sie ändern zum einen die Struktur der Scheibe und zum anderen beeinflussen sie sich gegenseitig durch ihre Schwerkraft. Es ist bekannt, dass sich drei große Planeten derart stören können, dass ihre Bahnen einen chaotischen Verlauf nehmen, wobei einer der Trabanten auf eine sternnahe Umlaufbahn ge-

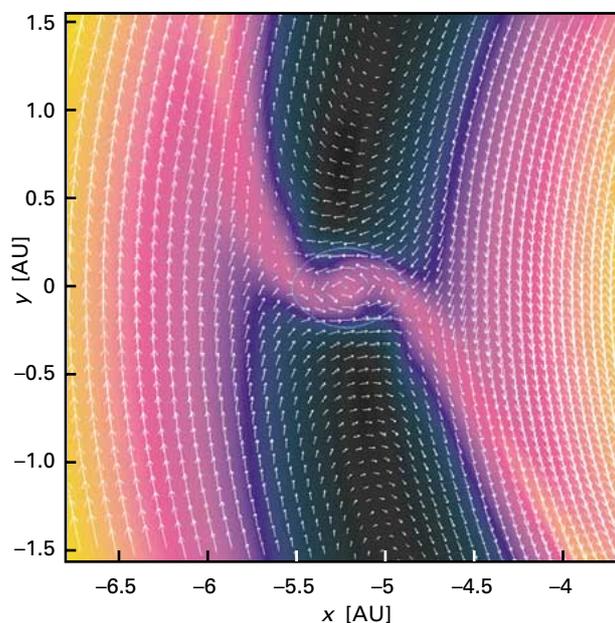


Abb. IV.6: Die Strömung in der Umgebung des Protoplaneten, bezogen auf den Planeten. Die blaue Linie symbolisiert das Roche-Volumen des Planeten.

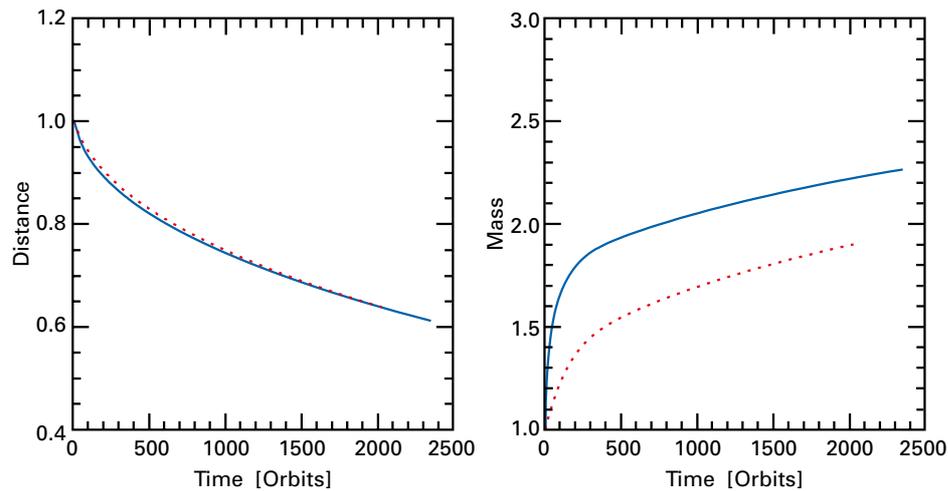


Abb. IV.7: Die Entwicklung der Umlaufbahn (links) und der Massenzunahme (rechts). Die schwarze Linie bezeichnet ein Modell geringerer Auflösung, die rote Linie eines höherer Auflösung. In beiden Fällen wird zu Beginn der Rechnungen eine Lücke bereits als vorhanden vorausgesetzt.

schleudert werden kann. Denkbar ist auch, dass Riesenplaneten noch weiter außen entstehen. Aus einer Entfernung von 20 AE würde der Körper etwa eine Million Jahre benötigen, um bis in den Innenbereich hineinzuwandern. Bis dahin wäre die Scheibe verschwunden und kein Drehimpulsübertrag mehr möglich. Es ist auch möglich, dass stellare Magnetfelder die Bewegung nach innen stoppen können.

Nun wollen die Theoretiker ihre Modelle verfeinern, indem sie weitere physikalische Effekte, wie Strahlungskühlung der Scheibe oder die Wirkung von Magnetfeldern mit einbeziehen.

Vom massearmen Stern zum Braunen Zwerg

Die Massen der Sterne überspannen einen weiten Bereich von etwa einer zehntel bis zu rund hundert Sonnenmassen. Wie weit genau diese Skala an beiden Enden reicht und welche Eigenschaften die Sterne dort haben, ist weder empirisch noch theoretisch gänzlich geklärt: Wo beispielsweise beginnt das Gebiet der Braunen Zwerge, die im Innern nicht mehr die energieerzeugende Kernfusion zünden, und wo liegt der Übergang zu den Planeten? Beobachtungen von zwei nahen Sternsystemen ermöglichten eine sehr genaue Helligkeits- und Massenbestimmung. Dabei erwiesen sich drei dieser Himmelskörper als extrem massearme Sterne mit 0.07 Sonnenmassen. Dies ist der Bereich, in dem Theoretiker den Übergang zu den Braunen Zwergen vermuten. Bei einer anderen Untersuchung ließen sich periodische Helligkeitsvariationen eines Braunen Zwergs nachweisen. Denkbare Erklärungen hierfür sind Staubwolken, die

den Himmelskörper umgeben, oder magnetische Aktivität. Eine dritte Studie schließlich ergab in dem offenen Sternhaufen M 35 eine Reihe von Kandidaten für Braune Zwerge.

Das Studium extrem massearmer Sterne bekam vor wenigen Jahren durch die Entdeckung Brauner Zwerge Aufwind. Wegen ihrer äußerst geringen Leuchtkräfte sind diese Himmelskörper jedoch nur schwer auffindbar. Der 1957 am Astronomischen Rechen-Institut in Heidelberg von W. Gliese herausgegebene Katalog beispielsweise enthält Sterne bis in etwa 20 Parsec (ca. 65 Lichtjahre) Entfernung. Er umfasst 915 Einzel- und Doppelsterne mit insgesamt 1094 Komponenten. Innerhalb dieser Gruppe ist die Sterndichte in 12 Lj Entfernung anscheinend dreimal größer als in 65 Lj. Geht man davon aus, dass die Sterne in Wirklichkeit etwa gleichmäßig verteilt sind, so muss man hieraus schließen, dass bereits in dieser verhältnismäßig geringen Entfernung die lichtschwächeren Sterne nicht mehr auffindbar sind. Das bedeutet, dass in einer Raumkugel um die Sonne mit einem Radius von 65 Lj über 3000 Sterne enthalten sind, von denen rund zwei Drittel noch gar nicht entdeckt sind.

Der lichtschwächste Stern im Gliese-Katalog ist ein 20 Lj entfernter Roter Zwerg mit einer absoluten visuellen Helligkeit von 18.5 mag. Damit besitzt dieser massearme Stern nur etwa 1/20 000 der Sonnenleuchtkraft. Aber endet dort die stellare Massenskala?

Theoretische Modelle sagen voraus, dass bei Sternen unterhalb einer bestimmten Masse die Zentraltemperatur so niedrig ist, dass die Fusion von Wasserstoff zu Helium, das Wasserstoffbrennen, nicht mehr in nennenswertem Umfang abläuft. Für eine kurze Zeit nach seiner Entstehung kann ein solcher Körper vermutlich noch Deuterium und Tritium verbrennen. Dann aber bricht auch dieser Prozess ab, und der Körper kühlt als Brauner Zwerg langsam aus.

Nach den jüngsten Rechnungen erfolgt der Übergang vom Stern zum Braunen Zwerg bei etwa 0.075 Sonnen-

massen. Bei etwa 0.013 Sonnenmassen (entsprechend etwa 13 Jupitermassen) findet nach heutigem Wissen der Übergang zu den Planeten statt. Bei einem Objekt um 0.08 Sonnenmassen lässt sich nur schwer entscheiden, ob es sich um einen Braunen Zwerg oder um einen extrem massearmen Roten Zwergstern handelt. Alle jungen Braunen Zwerg sind vom Spektraltyp M und lassen sich kaum von extrem massearmen Sternen unterscheiden. Erst wenn ein Brauner Zwerg älter ist als etwa eine Milliarde Jahre, ist seine Temperatur unter den Temperaturbereich massearmer Sterne abgesunken.

Astronomen des MPIA gelang es gemeinsam mit Kollegen, zwei extrem massearme Sternsysteme detailliert zu untersuchen. Dieses über mehrere Jahre laufende Projekt ermöglichte es, wichtige stellare Größen genau zu bestimmen und mit Modellen zu vergleichen. Dabei stellten sich drei der Himmelskörper als die masseärmsten bekannten Sterne der Sonnenumgebung heraus. Darüber hinaus ließ sich eindrucksvoll zeigen, dass in den Außenbereichen dieser kühlen Sterne Staub entsteht, dessen optische Eigenschaften beispielsweise bei der Ermittlung der Sternmassen eine große Rolle spielen.

Das Dreiersystem Gliese 866

Der Stern mit der Nummer 866 im Gliese-Katalog wurde dreißig Jahre lang als Einzelstern angesehen. 1986 entdeckten Astronomen des MPIA mit Hilfe der hochauflösenden Speckle-Interferometrie in nur 0.4 Bogensekunden Abstand vom Hauptstern einen Begleiter. Sofort erkannten sie die Möglichkeit, die Massen der beiden Sterne zu bestimmen, wenn man deren Umlaufbahn verfolgen könnte. Vier Jahre später schon lag der erste Wert vor. Demnach beträgt die Masse beider Sterne zusammen 0.38 Sonnenmassen. Sternmodelle ergaben indessen auf Grund der photometrischen Daten für beide Komponenten Massen von 0.14 bzw. 0.11 Sonnenmassen – in der Summe also viel weniger. Kürzlich entdeckten französische Astronomen bei spektroskopischen Untersuchungen von G 866 einen dritten, bis dahin unbekanntem Begleiter. Ließ sich damit die Diskrepanz in den beiden Massenbestimmungen lösen?

Um dieser Frage nachzugehen, beschlossen die Forscher am MPIA zusammen mit Kollegen vom Astronomischen Rechen-Institut in Heidelberg und aus den USA dieses interessante System genauer zu studieren. Für den Zeitraum von 1990 bis 1998 beobachteten sie Gliese 866 mehrmals mit dem 3.5-Meter-Teleskop auf dem Calar Alto sowie mit weiteren Teleskopen der ESO auf La Silla und mit dem Weltraumteleskop Hubble. Das Ergebnis waren 37 unabhängige Datenpunkte, aus denen sich die Umlaufbahn der beiden hellsten Komponenten rekonstruieren ließ (Abb. IV.8).

Bei einer Entfernung von 11.2 Lj ergab sich eine elliptische Bahn (Exzentrizität $e = 0.437$) mit einer großen Halbachse von 1.2 AE und einer Umlaufperiode von 2.25 Jahren. Hieraus lässt sich mit dem zweiten Keplerschen Ge-

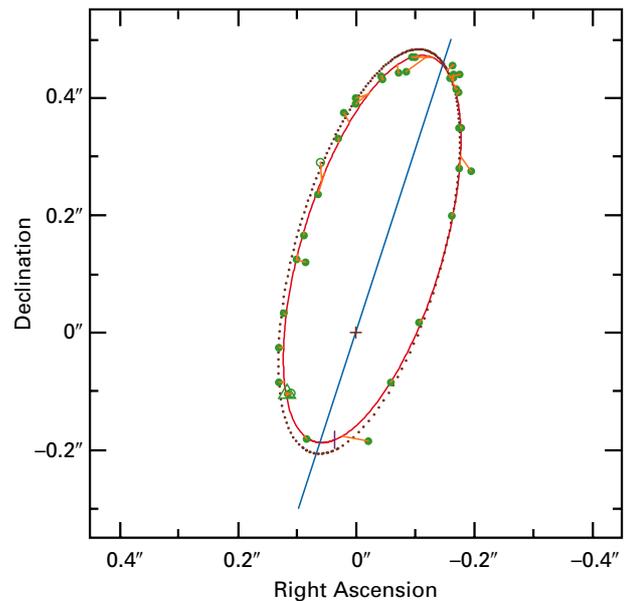


Abb. IV.8: Die Umlaufbahn von Gliese 866 AB (durchgezogene Linie). Die gepunktete Linie kennzeichnet eine ältere Bahnbestimmung.

setz die Gesamtmasse zu (0.336 ± 0.026) Sonnenmassen errechnen, wobei der größte Teil des Fehlers auf die Unsicherheit der Entfernung zurückgeht. Damit war der Massenwert im Vergleich zu 1990 nach unten korrigiert, lag aber nach wie vor signifikant über dem aus den photometrischen Messungen hergeleiteten Wert.

Die Frage, ob zumindest eine der Komponenten ein Brauner Zwerg ist, lässt sich aus den kinematischen Daten nicht beantworten. Photometrische und spektroskopische Untersuchungen sprechen aber dafür, dass alle drei Komponenten sehr ähnliche Effektivtemperaturen aufweisen. Da sie sehr wahrscheinlich gleich alt sind, müssen sie daher auch ähnliche Massen besitzen. Schließlich ergaben sich für die drei Sterne Massen von jeweils 0.11 Sonnenmassen. Selbst bei einem Fehler von 10 bis 20 Prozent scheint es sicher, dass keines der Mitglieder von Gliese 866 ein Brauner Zwerg ist. Damit ist das anfängliche Problem der fehlenden Masse durch den dritten Begleiter gelöst.

Diese Arbeit ist vor allem aus stellarastrophysikalischer Sicht von großer Bedeutung, da hier die Bahnbewegung der Komponenten und damit die Gesamtmasse zweifelsfrei bestimmt werden konnte. Da diese Sterne am unteren Ende der Massenskala liegen, werden sie zukünftig als Prüfsteine für Sternmodelle dienen. Ganz ähnlich verhält es sich mit dem Mehrfachsystem LHS 1070, das ebenfalls sehr detailliert untersucht wurde.

Das Vierersystem LHS 1070

Himmelskörper am Übergang von massearmen Sternen zu Braunen Zwergen sollten etwa vom Spektraltyp M8 oder später sein. Seit etwa 1995 wurden immer mehr die-

ser interessanten Objekte gefunden. Spektroskopische Untersuchungen legten es kürzlich nahe, die Spektralklassen M9 und später neu zu definieren und sie mit dem Spektraltyp L zu bezeichnen. Charakteristisch für diese Klasse ist, dass die Moleküllinien von Titanoxid (TiO) und Vanadiumoxid (VO), auf denen gerade die Definition der M-Klasse beruht, unerwartet schwach oder gar nicht vorhanden sind. Stattdessen werden Linien der Alkalielemente Kalium, Natrium, Rubidium und Cäsium stärker. Erst kürzlich deutete sich die Ursache hierfür an: Zwergsterne mit Effektivtemperaturen bis 2600 K weisen in der Photosphäre nur noch Temperaturen um 1500 K auf – kühl genug, damit sich Staub bilden kann. Auf den Staubkörnchen kondensieren dann Elemente wie Titan (Ti) oder Vanadium (V) aus, während die leichter flüchtigen Alkalielemente gasförmig bleiben.

Eine interessante Frage ist, was mit dem Staub passiert. Möglich ist, dass er Wolken bildet und in die Photosphäre niedersinkt, oder dass er eine Dunstschicht um den Stern bildet und hier einen Treibhauseffekt ausübt. Zudem stellt sich auch hier die Frage, inwieweit Sterne und Braune Zwerge sich in der mutmaßlichen Staubbildung unterscheiden.

In der nahen Sonnenumgebung sind derzeit nur zwei Sternsysteme bekannt, in denen sich Objekte vom späten M- oder frühen L-Typ befinden und für die sich die Bahnparameter bestimmen lassen. Eines ist LHS 1070. Im Jahre 1994 konnten Astronomen am MPIA mit Speckle-Interferometrie bei $2.2\ \mu\text{m}$ erstmals die räumliche Anordnung von drei Sternen bestimmen (Abb. IV.9). Demnach waren die beiden Komponenten A und B damals um $1''.1$ voneinander getrennt, während Komponente C $0''.27$ nördlich von B stand. Bei einer zweiten Beobachtung 1998 war C um 69 Grad gegen den Uhrzeigersinn gewandert und war 0.36 Bogensekunden von B entfernt. Kürzlich entdeckten amerikanische Astronomen bei spektroskopischen Untersu-

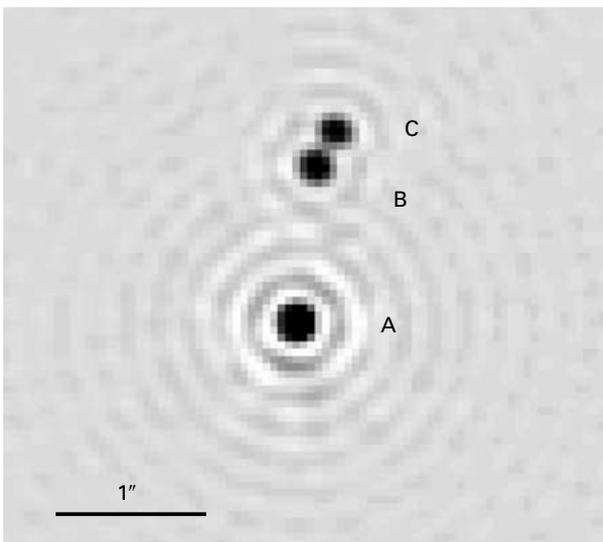


Abb. IV.9: Das System LHS 1070 im Infraroten bei $2.2\ \mu\text{m}$ Wellenlänge.

Tabelle IV.1. Grundgrößen der drei Komponenten des Dreifachsterns LHS 1070 bei einer Entfernung von 28.7 Lj.

Komponente	Spektraltyp	absolute Helligkeit (visuell)	Effektivtemperatur [K]	Masse [M_{\odot}]
A	M5.5 – 6	15.63	2950	0.1
B	M8.5 – 9	18.96	2400	0.08
C	M9 – 9.6 (L0)	19.35	2300	0.08

chungen mit dem Weltraumteleskop Hubble eine vierte, nur $0''.05$ von A entfernte Komponente. LHS 1070 ist damit ein ideales Studienobjekt für massearme Sterne.

Spektroskopische und photometrische Beobachtungen mit Hubble bildeten die Grundlage einer detaillierten Analyse, die anschließend mit einem Sternatmosphärenmodell durchgeführt wurde. Dieses Modell ist in einem Temperaturbereich von 1500 bis 3000 K anwendbar und berücksichtigt zusätzlich zum normalen Strahlungstransport die Entstehung von über 600 Arten gasförmiger und staubartiger Partikeln sowie die Opazitäten unterschiedlicher Staubarten, so weit diese aus Laborexperimenten bekannt sind.

Die Spektralklassen wurden nach unterschiedlichen Kriterien ermittelt, wobei die Spanne von jeweils etwa einer halben Größenklasse in der Absoluthelligkeit die Unsicherheit in diesem Bereich der Massenskala verdeutlicht (Tabelle IV.1). Während die Astronomen bei den Komponenten A und B bereits ähnliche Vertreter kennen, weist die Komponente C ein sehr ungewöhnliches Spektrum auf. In dem neuen Klassifikationsschema würde man C zu der Spektralklasse L0 zählen. Die Absoluthelligkeiten hängen entscheidend von der angenommenen Entfernung ab. Parallaxische Messungen ergeben für LHS 1070 einen Wert von 24.1 Lj. Dieser Wert gilt jedoch wegen der Multiplizität des Systems als unsicher. Die besten Anpassungen der Modelle an die Spektren ergaben sich in der hier beschriebenen Arbeit bei einer Entfernung von 28.7 Lj, die deshalb auch bei den weiteren Analysen verwendet wurde.

Aus den Spektren ergaben sich mit dem Modell die Massen der Einzelkomponenten zu 0.08 Sonnenmassen für B und C sowie 0.1 Sonnenmasse für A. Damit ist A aller Wahrscheinlichkeit nach ein massearmer Stern und nicht ein Brauner Zwerg. B und C befinden sich gerade im Übergangsgebiet. Diesen Werten liegt ein angenommenes Alter von fünf Milliarden Jahren und eine solare Elementhäufigkeit zu Grunde. Nimmt man statt dessen ein Alter von einer Milliarde Jahre an und verringert die Häufigkeit schwerer Elemente um einen Faktor drei, so ändern sich die ermittelten Massen lediglich um einige tausendstel Sonnenmassen. Bemerkenswert an LHS 1070 ist, dass die Komponenten B und C (und so weit bekannt auch D) die leuchtschwächsten Sterne innerhalb von 65 Lj Umkreis um die Sonne sind, für die eine Massenbestimmung auf Grund von Bahnbewegungen (wie bei Gliese 866) inner-

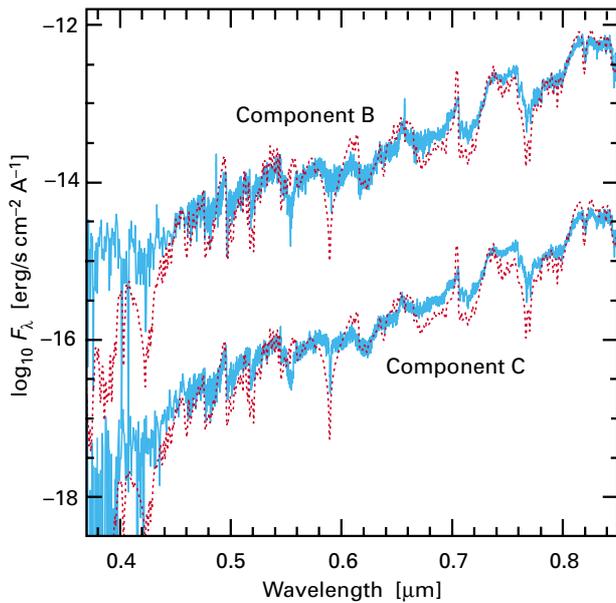


Abb. IV.10: Spektren der Komponenten B und C von LHS 1070 im Vergleich mit einem Modell (gepunktete Linie).

halb der nächsten Jahre möglich sein sollte. Die Umlaufperiode liegt unterhalb von 20 Jahren.

Mit dem neuen Sternatmosphärenmodell, das auch Staubbildung berücksichtigt, ließen sich die Spektren im Großen und Ganzen sehr gut wiedergeben (Abb. IV.10), was bis dahin nicht möglich gewesen war. Dabei zeigte sich deutlich, dass die hellste Komponente A zu heiß ist, um signifikante Mengen an Staub zu bilden. B und C hingegen sind die staubreichsten derzeit bekannten Sterne. In welcher Form der Staub vorliegt, ist nicht bekannt. Die Daten deuten jedoch an, dass sich die Partikel in dünnen Schichten ansammeln, die dann langsam in die Photosphäre niedersinken. Mehr Informationen zu dieser Frage sind wahrscheinlich in Beobachtungsdaten verborgen, welche die Astronomen bereits im nahen Infrarot mit dem Weltraumteleskop Hubble und mit ISO gewonnen haben.

Staubwolken am Himmel Brauner Zwerge?

Die ersten Braunen Zwerge wurden in dem 380 Lj entfernten, offenen Sternhaufen der Plejaden entdeckt. Astronomen des MPIA untersuchten 1999 sechs Mitglieder dieses Haufens, von denen drei sicherlich Braune Zwerge sind, zwei sind sehr massearme Sterne, und von einem ist die Natur noch nicht geklärt. Mit dem 2.2-Meter-Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums suchten die Forscher bei den sechs Himmelskörpern nach Helligkeitsschwankungen. Treten diese periodisch auf, so hängen sie sehr wahrscheinlich mit der Rotation zusammen. Diese wichtige stellare Größe hängt vom Alter oder von der Masse des Himmelskörpers ab und liefert so Anhaltspunkte für die Entstehung und Entwicklung der Braunen Zwerge.

Denkbar sind Helligkeitsschwankungen auch auf Grund magnetischer Aktivitäten. Theoretische Modelle deuten zumindest für massereichere Sterne einen Zusammenhang zwischen Rotationsgeschwindigkeit und magnetischer Aktivität an. Ob es auch bei den masseärmsten Sternen eine solche Relation gibt, ist völlig unklar. Denkbar ist aber, dass magnetische Aktivität Sternflecken hervorruft, die Helligkeitsvariationen mit der Periode der Rotationsdauer zur Folge haben. Diese Helligkeitsschwankung sollten dann vor allem im Lichte der Wasserstofflinie $H\alpha$ auftreten.

In der hier beschriebenen ersten Untersuchung ließen sich bei fünf der sechs Objekte Helligkeitsvariationen mit Amplituden zwischen 0.025 und 0.07 Größenklassen im Zeitintervall zwischen etwa einer halben und rund hundert Stunden ausschließen. Lediglich bei dem massearmen Stern mit der Bezeichnung 2M 1145 wurden die Astronomen fündig (Abb. IV.11). Hier entdeckten sie eine periodische Variation mit einer Dauer von 7.12 Stunden und einer Amplitude von 0.04 mag.

Die Ursache dieser Variation ist nicht bekannt, wahrscheinlich ist sie aber auf die Rotation zurückzuführen. Bei einem angenommenen Radius von 0.1 Sonnenradien entspricht die Rotationsdauer einer Umlaufgeschwindigkeit am Äquator von 17 km/s. Damit liegt dieses Objekt im Rahmen von 2 bis 32 km/s, den man für M-Zwergsterne in der Sonnenumgebung ermittelt hat. Es liegt jedoch unterhalb des Bereichs von 37 bis 65 km/s, den man für neun M-Zwerge in den Plejaden bestimmt hat.

Wie sich dieses neue Ergebnis hier einfügen lässt, ist noch nicht klar. Ist die Helligkeitsschwankung auf magnetische Aktivität zurückzuführen, so sollte sie sich insbesondere in der $H\alpha$ -Emission zeigen. Denkbar ist aber auch, dass sich in der Atmosphäre von 2M 1145 Staubwol-

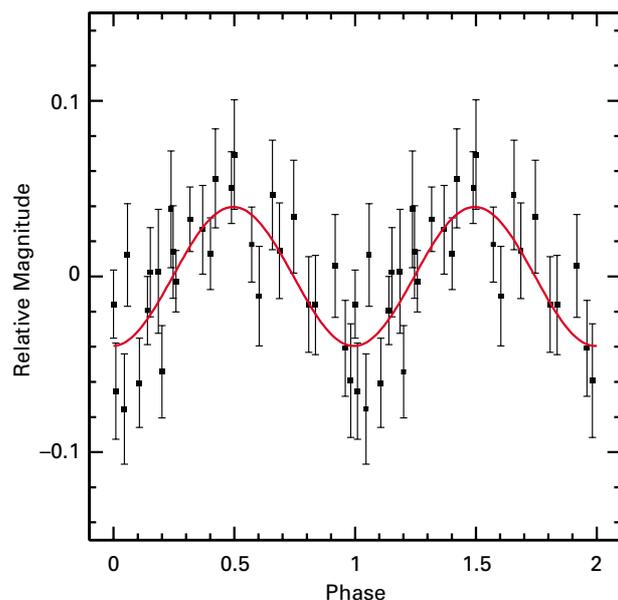


Abb. IV.11: Die Lichtkurve des L-Zwergsterns 2M 1145. Die Periode beträgt 7.12 Stunden.

ken bilden, die einen mehr oder weniger großen Teil der Sternscheibe verdunkeln. Rotieren sie mit dem Stern, so könnten auch sie die Helligkeitsvariationen hervorrufen. Mit weiteren Beobachtungen in verschiedenen Filterbereichen wollen die Astronomen am MPIA diesem Phänomen auf den Grund gehen.

Kandidaten für Braune Zwerge in dem Offenen Sternhaufen M 35

Bislang sind nur wenige Braune Zwerge eindeutig identifiziert worden. Um die Häufigkeit und die Eigenschaften dieser lichtschwachen Himmelskörper herauszufinden, müssen zunächst wesentlich mehr von ihnen entdeckt werden. Diese Möglichkeit bietet eine photometrische Studie, die ein Forscher des MPIA am Canada-French-Hawaii-Teleskop auf Mauna Kea durchgeführt hat. Dort gelangen ihm tiefe Aufnahmen des offenen Sternhaufens M 35

durch zwei Filter im roten (R) und infraroten Wellenlängenbereich (I).

Der rund 3000 Lichtjahre entfernte M 35 gehört zu den schönsten, noch mit bloßem Auge sichtbaren Sternhaufen (Abb. IV.12). Seine scheinbare Größe am Himmel entspricht etwa der des Vollmonds. Nach neuesten Analysen ist er mit 125 Millionen Jahren so jung wie die Plejaden (s. den folgenden Abschnitt); mit einer geschätzten Gesamtmasse von 1000 bis 3000 Sonnenmassen ist er allerdings um einiges massereicher.

Primäres Ziel der Arbeit war es, die Leuchtkraft- und Massenfunktion der Sterne zu ermitteln. Hierfür ist es zunächst einmal wichtig, die Mitglieder des Haufens von solchen Sternen zu trennen, die nur zufällig in der selben Richtung stehen. Das erreicht man, indem man ein Farben-Helligkeits-Diagramm aller Sterne erstellt (Abb.

Abb. IV.12: Der offene Sternhaufen M 35.



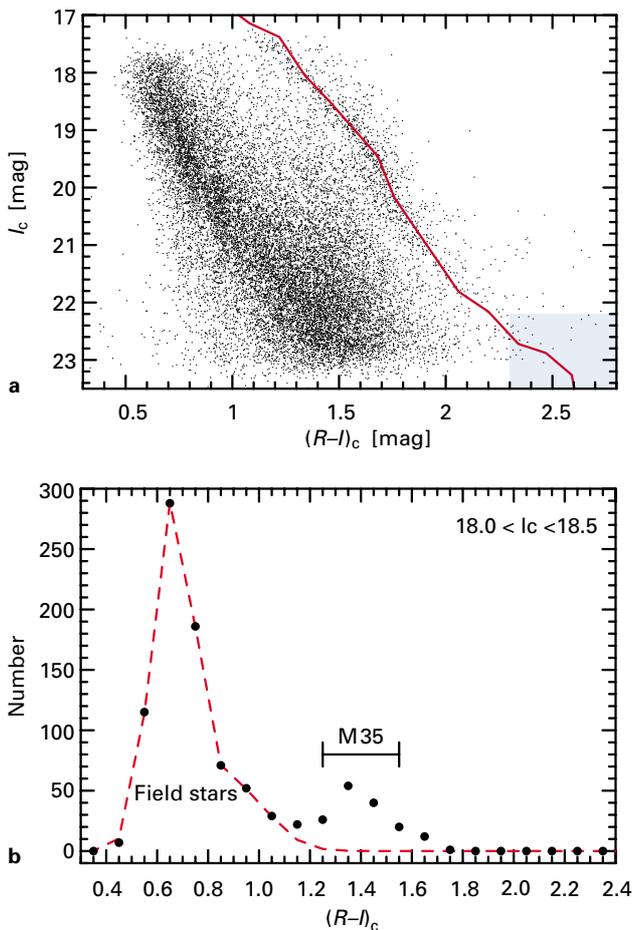


Abb. IV.13: (a) Farben-Helligkeits-Diagramm von Sternen in M 35 (in der nahen Umgebung der Hauptreihe) und Feldsternen; der Bereich der Braunen Zwerge ist gekennzeichnet. (b) Histogramm der Feld- und Haufensterne.

IV.13). Da die Entfernung des Haufens bekannt ist, lässt sich die Hauptreihe, auf der die Mitglieder von M 35 liegen müssten, in das Diagramm eintragen. Tatsächlich zeigen sich zwei Gruppen: zum einen die Mitglieder von M 35 auf dieser Kurve und zum anderen die Feldsterne, die durchschnittlich um vier Größenklassen schwächer sind. Zwar erfolgt die Trennung zwischen Feld- und Haufensternen nicht ganz übergangslos, aber mit einer statistischen Methode ließen sich schließlich die Haufenmitglieder mit hoher Wahrscheinlichkeit separieren.

Die Leuchtkraftfunktion von M 35 erwies sich nun als nahezu identisch mit derjenigen der Plejaden, was darauf hindeutet, dass die Sternentstehungsrate für Sterne unterschiedlicher Masse nicht von der Größe des Sternentstehungsgebietes abhängt (M 35 enthält wesentlich mehr Sterne als die Plejaden). Der Datensatz für M 35 ist bis zu 19. absoluten Größenklasse im Infraroten vollständig. Die schwächeren Sterne wurden nicht alle erfasst und bei ihnen nimmt auch der Anteil von nicht erkannten Feldsternen zu.

Der Bereich der Braunen Zwerge würde bei einem Haufenalter von 125 Millionen Jahren bei $I = 22.2$ mag

und $(R - I) = 2.3$ mag liegen. Wie aus Abb. IV.13a zu ersehen, gibt es in diesem Bereich etwa 20 Objekte. Gewissheit über ihre Natur sollen zukünftige Beobachtungen bringen.

Neue Altersskala für Sternhaufen

Die Altersbestimmung von Sternen gehört zu den zentralen Aufgaben der Astrophysik. Aus dem Alter der Sternpopulationen in der Milchstraße lässt sich beispielsweise auf die Entstehung und die Entwicklung unserer Galaxis schließen. Bei jungen Sternhaufen ist eine genaue Kenntnis des Alters von großer Bedeutung, wenn man darin Braune Zwerge sucht. Deren Temperaturen, Helligkeiten und Farben hängen nämlich entscheidend von ihrem Alter ab. Eine neue Methode der Altersbestimmung beruht auf der Tatsache, dass in massearmen Sternen Lithium zerstört wird. Das heißt, mit steigendem Alter nimmt der Lithiumanteil in ihren Atmosphären ab. Mit Hilfe dieses Kriteriums wurde das Alter der offenen Sternhaufen IC 2391, Plejaden und NGC 2516 neu bestimmt. Demnach sind diese Haufen wesentlich älter als bislang angenommen.

Es gibt verschiedene Methoden der Altersbestimmung, von denen die meisten auf der Theorie der Sternentwicklung beruhen. Bei jungen Sternen, in deren Innern die Kernfusionsprozesse noch nicht eingesetzt haben und die die Hauptreihe noch nicht erreicht haben, erhält man das Alter aus ihrer Position beispielsweise in einem Farben-Helligkeits-Diagramm in Verbindung mit theoretischen Modellen der Sternentstehung. Hat ein Stern aber die Hauptreihe erreicht, so ist die Bestimmung seines Alters sehr schwierig, da er sich während des Hauptreihenstadiums im Farben-Helligkeits-Diagramm kaum bewegt.

Am ehesten lässt sich noch das Alter eines Sternhaufens bestimmen. Hierbei geht man davon aus, dass alle Mitglieder etwa zur selben Zeit entstanden sind. Da die Lebensdauer der Sterne (ihre Verweilzeit auf der Hauptreihe) mit zunehmender Masse abnimmt, verschiebt sich die Massengrenze der Mitgliedsterne mit zunehmendem Alter der Haufen nach unten: Je älter der Haufen, desto masseärmer ist der massereichste Stern auf seiner Hauptreihe. Dies ist ein gutes Kriterium für die Altersbestimmung, aber auch diese Methode ist abhängig von den Sternentwicklungsmodellen.

Die Methode der Lithiumanreicherung

Erst vor wenigen Jahren wurde ein neues Verfahren vorgeschlagen, das auf einer gänzlich anderen Grundlage beruht. Man nennt sie die Methode der Lithiumanreicherungsgrenze. Sie basiert auf folgender Überlegung. Es ist schon länger bekannt, dass die Kernreaktionen im Innern

massearmer Sterne und Brauner Zwerge Lithium zerstören, aber nicht bilden. Das heißt, der Lithiumanteil wird mit zunehmendem Alter dieser Körper immer geringer. Die Zerstörungsrate hängt von der Masse ab: Je massereicher der Stern ist, desto schneller baut er Lithium ab. Unter den gleichaltrigen massearmen Mitgliedern eines Sternhaufens gibt es also eine Grenze zwischen den massereicheren Sternen, die das Lithium bereits gänzlich abgebaut haben, und den masseärmeren, die noch nicht so weit sind. Mit zunehmendem Alter wandert diese Lithiumabreicherungsgrenze zu immer masseärmeren Mitgliedern. Damit hat man ein weiteres Kriterium für das Alter eines Haufens. Auch diese Methode ist von einem Modell abhängig. Sie verspricht aber sehr scharfe Grenzen für das Alter eines Haufens zu liefern.

Bis vor kurzem ließ sich diese Methode nicht anwenden, weil nicht genügend massearme Sterne und Braune Zwerge nachweisbar waren. Erst 1998 konnte hiermit erstmals das Alter der Plejaden (Abb. IV.14) bestimmt werden. Das Ergebnis war überraschend: Die Lithiummethode erbrachte ein Alter von 125 Millionen Jahren und lag damit erheblich über dem bisherigen Standardwert von 70 Millionen Jahren.

Hierdurch ermutigt, untersuchten Forscher des MPIA mit dem 4-Meter-Teleskop des Cerro Tololo Interamerican Observatory in Chile den offenen Sternhaufen IC 2391. Mit einer Entfernung von nur 500 Lichtjahren ist der fünf-

nächste offene Sternhaufen leicht mit bloßem Auge am Südhimmel erkennbar. Seine Ausdehnung am Himmel ist rund viermal so groß wie die des Vollmonds.

Frühere Untersuchungen hatten zwar auf ein geringes Alter hingewiesen, aber eine genaue Datierung war nicht möglich gewesen. Erst mit empfindlicheren Detektoren war man in der Lage, in IC 2391 mehrere Dutzend extrem massearme Sterne und mutmaßlicher Brauner Zwerge aufzuspüren. Identifiziert wurden die Kandidaten mit Hilfe photometrischer Aufnahmen im roten und infraroten Wellenlängenbereich. Insgesamt drei Stunden Belichtungszeit im Roten und zwei Stunden im Infraroten waren nötig, um den ausgedehnten Haufen weitgehend abzudecken. Um den Lithiumtest durchzuführen, sind aber Spektren in einem Bereich um 670.8 nm Wellenlänge nötig, wo es eine starke Lithiumabsorptionslinie gibt. Von 19 Objekten, die eindeutig als Mitglieder von IC 2391 identifiziert wurden, konnten Spektren angefertigt werden, wobei Belichtungszeiten zwischen 10 Minuten und 4.5 Stunden nötig waren.

Abb. IV.15 zeigt drei Beispiele, die deutlich zeigen, wie die Lithiumabsorptionslinie von einem schwachen Stern (CTIO-038) mit einer Infrarothelligkeit von 16.29 mag

Abb. IV.14: Der offene Sternhaufen der Plejaden, hier in einer Aufnahme vom Calar-Alto-Observatorium, ist möglicherweise erheblich älter als bislang angenommen.



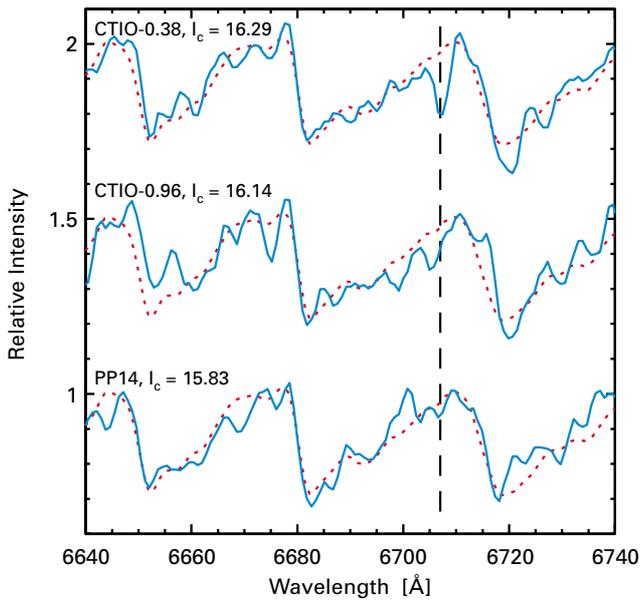


Abb. IV.15: Spektren von drei lichtschwachen Sternen in IC 2391. Man erkennt, wie die Lithiumabsorption bei 6708 Ångström von dem lichtschwächsten Stern (oben) zum helleren Stern (unten) verschwindet.

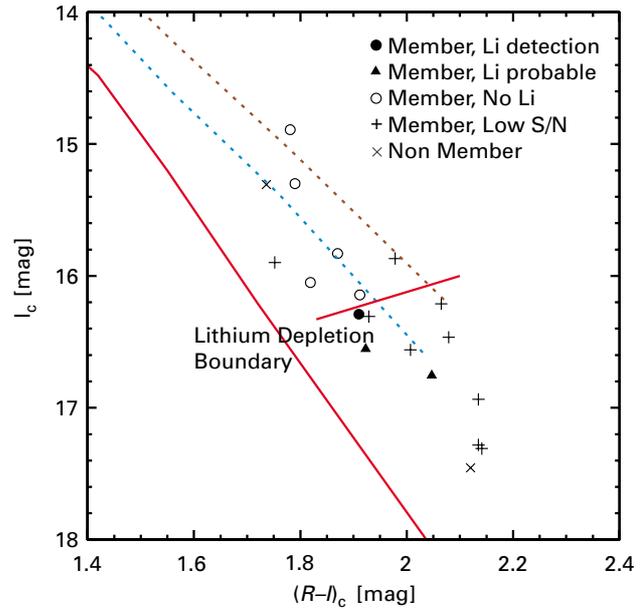


Abb. IV.16: Die aus den Spektren abgeleitete Lithiumabreicherungsgrenze für IC 2391.

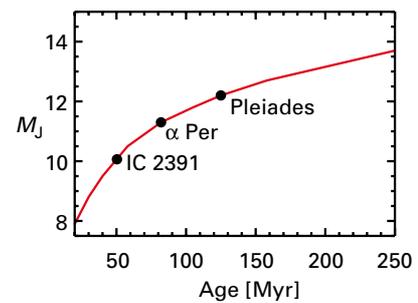
über einen etwas helleren mit $I = 16.14$ mag zu einem noch helleren Stern mit $I = 15.83$ mag verschwindet. In zwei anderen Sternen, die noch schwächer als CTIO-038 sind, ließ sich die Lithiumlinie noch nachweisen. Nach diesen Beobachtungen liegt die Lithiumabreicherungsgrenze bei einer scheinbaren Helligkeit im Infraroten zwischen 16.0 mag und 16.3 mag (Abb. IV.16). Hieraus ergibt sich ein Alter von 53 Millionen Jahren, das wiederum erheblich höher ist als der bisher angenommene Wert von 35 Millionen Jahren. Diese Diskrepanz könnte auf Unvollkommenheiten der Sternentwicklungsmodelle beruhen, die den bisherigen Altersbestimmungen zu Grunde liegen.

Mit dem neuen Alter ergibt sich auch eine neue Helligkeitsgrenze für Braune Zwerge. Bei dem jetzigen Alter von 53 Millionen Jahren sollte ein Himmelskörper an der Übergangsgrenze vom Stern zum Braunen Zwerg, die bei etwa 0.075 Sonnenmassen angenommen wird, im Infraroten eine absolute Helligkeit von 11.15 mag besitzen. Ist dies der Fall, so müssten die zwei schwächsten beobachteten Körper in der Tat Braune Zwerge sein.

Abb. IV.17 zeigt, wie die Lithiumabreicherungsgrenze mit zunehmendem Alter zu immer schwächeren Sternen wandert. Aufgetragen sind die drei offenen Sternhaufen, auf die diese Methode bisher erfolgreich angewendet wurde. Hier wurde auch der Haufen um Alpha Persei aufgenommen. Auch bei ihm lieferte die Lithiummethode ein höheres Alter als bisher angenommen, und zwar 85 Millionen statt 50 Millionen Jahre.

Die neue Methode führt demnach bei allen bisher untersuchten offenen Haufen auf ein rund 50 % höheres Alter als die Standardmethoden. Sollte sich dies zukünftig bestätigen, so müsste man eine neue Altersskala für diese

Abb. IV.17: Die Lithiumabreicherungsgrenze wandert mit zunehmendem Alter des Sternhaufens zu immer lichtschwächeren, masseärmeren Sternen.



Sternhaufen erwägen. Dies hätte eine ganze Reihe von Konsequenzen. Zum einen müssten die Modelle der Sternentwicklung überprüft werden. Zum anderen würde sich die Suche nach Braunen Zwergen erschweren. Denn sie entstehen als heiße Himmelskörper und kühlen anschließend langsam aus. Je älter ein Haufen ist, desto kühler, und damit röter und lichtschwächer sind demnach die in ihm enthaltenen Braunen Zwerge.

Das Alter der »Scheibensterne« Wega, Fomalhaut und Beta Pictoris

Mitte der achtziger Jahre stießen Astronomen bei den Sternen Wega, Fomalhaut und Beta Pictoris auf intensive Infrarotstrahlung. Nachfolgende Untersuchungen zeigten dann, dass sie von Staubscheiben stammt, welche die Sterne umgeben. Daraufhin sprach man auch vom Wega-Phänomen. Untersuchungen aus jüngerer Zeit ergaben, dass sich die Scheiben offenbar im Verlauf von einigen hundert Millionen Jahren auflösen. An diesem Ergebnis waren Astronomen des Instituts maßgeblich beteiligt (s. Jahresbericht 1998, S. 11). Eine Schwierigkeit bei diesen

Untersuchungen ist die Frage nach dem Alter der Sterne. Für Beta Pictoris beispielsweise schwanken die Schätzungen zwischen zehn und mehreren hundert Millionen Jahren. Hier konnte nun eine Studie am MPIA mehr Klarheit schaffen. Sie ergab für Wega und Fomalhaut ein Alter von 200 Millionen und für Beta Pictoris von 20 Millionen Jahren.

Die Herkunft dieser Scheiben ist nicht abschließend geklärt. Einerseits könnten sie Überbleibsel aus der Entstehungszeit des Sterns sein. Andererseits ist es auch denkbar, dass die Staubteilchen kontinuierlich erzeugt werden und die Scheibe ständig erneuert wird. Für die zweite Möglichkeit spricht die Tatsache, dass mehrere Einflüsse, wie der Teilchenwind des Sterns und das Sternlicht, auf die Teilchen einwirken und die Scheibe zerstören. Gleichzeitig können sich durch das Zusammenlagern der Partikel größere Körper bis hin zu Planeten bilden, wodurch der Staubvorrat der Scheibe ebenfalls verbraucht wird (s. »Junge Planeten auf Wanderschaft«). Diese Vorgänge sollten bewirken, dass eine Scheibe bereits zerstört ist, bevor der Stern das Hauptreihenstadium erreicht.

Nachgeliefert wird der Staub möglicherweise von Planetoiden und Kometen, so wie es in unserem Sonnensystem der Fall ist. Auch hier wird der interplanetare Staub ständig verbraucht und neu produziert. Rund zwei Drittel der interplanetaren Teilchen entstehen bei Kollisionen von Planetoiden, der Rest stammt von Kometen. Es ist durchaus denkbar, dass es auch in den Staubscheiben um Wega, Fomalhaut und Beta Pictoris bereits Planetoiden und Kometen gibt, die Staub erzeugen. Diese Vorgänge sind aus Sicht der Planetenentstehung und Sternentwicklung äußerst interessant. Eine der Schlüsselgrößen im Verständnis der Entwicklung solcher Scheiben ist selbstverständlich ihr Alter.

Beta Pictoris

Altersbestimmungen beispielsweise von Beta Pictoris mit Hilfe von Sternentwicklungsmodellen haben in der jüngeren Vergangenheit zu völlig unterschiedlichen Werten geführt. 1995 kamen Theoretiker zu einem Alter um 12 Millionen Jahre. Andere Versuche führten auf Werte von 20 bis 40 Millionen, 100 Millionen und sogar über 300 Millionen Jahre. Unklar ist auch, ob sich Beta Pictoris bereits auf der Hauptreihe befindet oder kurz davor steht.

Die neue am MPIA durchgeführte Studie geht nun von einem ganz anderen Ansatz aus. Hier wird angenommen, dass der zu untersuchende Stern gleichzeitig mit anderen Sternen in einem Haufen entstanden ist. Es ist daher denkbar, dass man andere Haufenmitglieder findet, deren Alter sich leichter bestimmen lässt. Bei den drei Sternen vom Wega-Typ ließ sich bislang allerdings keine Zugehörigkeit zu einem offenen Sternhaufen nachweisen. Es wurde daher versucht herauszufinden, ob diese Schei-

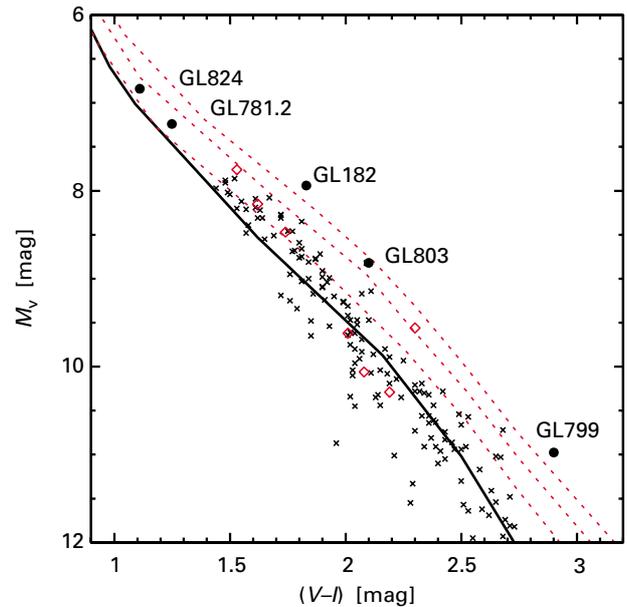


Abb. IV.18: Farben-Helligkeits-Diagramm mit der Hauptreihe (durchgezogene Linie) und den Isochronen für 20, 30 und 50 Millionen Jahre alte Sterne.

bensterne eventuell Bewegungsternhaufen angehören. Dies sind offene Sternhaufen, deren Mitglieder sich räumlich schon weit voneinander entfernt haben. Man erkennt sie nur daran, dass sie nahezu identische Raumbewegungen aufweisen.

Die Suche nach Bewegungsternhaufen ist äußerst mühsam, da sie am Himmel nicht als Sternansammlung erkennbar sind. Bei einem der bekanntesten Beispiele, dem Ursae-Majoris-Haufen, sind die Mitglieder über den ganzen Himmel verstreut. Die Sonne steht inmitten dieses Haufens, ohne ihm anzugehören. Bei der MPIA-Studie griffen die Astronomen auf ältere Arbeiten zurück, in denen Begleiter von Beta Pictoris vermutet aber letztlich nicht identifiziert wurden. Von diesen Sternen wurden zunächst die Entfernungen und Eigenbewegungen ermittelt, wofür ihnen der Sternkatalog des europäischen Astrometriesatelliten HIPPARCOS und der PPM-Katalog des Heidelberger Astronomischen Rechen-Instituts zur Verfügung standen. Die Radialgeschwindigkeiten waren ebenfalls seit 1995 bekannt. Aus diesem Datensatz ermittelten die Forscher nun die Raumbewegungen der Sterne und verglichen sie mit derjenigen von Beta Pictoris. So blieben zunächst sechs Kandidaten als mögliche Begleiter dieses Scheibensterns übrig. Einer wurde verworfen, weil er offenbar wesentlich älter ist als Beta Pictoris, ein weiterer konnte wegen fehlender Beobachtungsdaten nicht in die Analyse mit einbezogen werden. Blieben also nur vier Sterne.

Diese Kandidaten wurden zusammen mit theoretischen Entwicklungswegen junger Sterne in ein Farben-Helligkeits-Diagramm eingetragen (Abb. IV.18). Hiernach sind zwei von ihnen (GL 799 und GL 803) 20 Millionen und die beiden anderen (GL 781.2 und GL 824) 40 Millionen Jahre alt. Für dieses geringe Alter spricht auch, dass zumindest

die beiden Sterne GL 803 und GL 799 auf Bildern des Satellitenteleskops ROSAT starke Röntgenaktivität zeigen. GL 824 zeigt hingegen keine intensive Röntgenstrahlung und sollte somit älter sein. Auf Grund dieser Untersuchungen ergibt sich für die Beta-Pictoris-Bewegungsgruppe ein Alter von (20 ± 10) Millionen Jahren. Damit ist dieser Scheibenstern jünger, als die meisten Studien bislang ergeben haben.

Fomalhaut und Wega

Zu Beginn der neunziger Jahre wurde bereits vermutet, dass eine Gruppe von 18 Sternen, darunter Castor, einer der beiden Zwillinge, eine Bewegungsgruppe bilden. Es schien sogar möglich, dass auch Wega und Fomalhaut diesem Sternstrom angehören. Die MPIA-Forscher bezogen diese 18 Sterne sowie 26 weitere Kandidaten in ihre neue Untersuchung ein und ermittelten zunächst aus dem HIPPARCOS- und PPM-Katalog deren Helligkeiten in verschiedenen Spektralbereichen sowie deren Eigenbewegungen und Entfernungen. Die Radialgeschwindigkeiten waren ebenfalls bereits bekannt. Mit Hilfe dieses umfangreichen Datenmaterials ließen sich einige Sterne als Mitglieder des Castor-Bewegungshaufens ausschließen.

Abb. IV.19 zeigt die beiden galaktischen Geschwindigkeitskomponenten U und V der verbliebenen Kandidaten, wobei eine nahezu identische V -Komponente (parallel zur galaktischen Scheibe in Bewegungsrichtung) als stärkstes Kriterium für die Zugehörigkeit zu einem Bewegungshaufen gewertet wurde. Weitere Kriterien waren die Positionen der Sterne in einem Farben-Helligkeits-Diagramm sowie deren stellare Aktivität im Bereich der Wasserstoff-

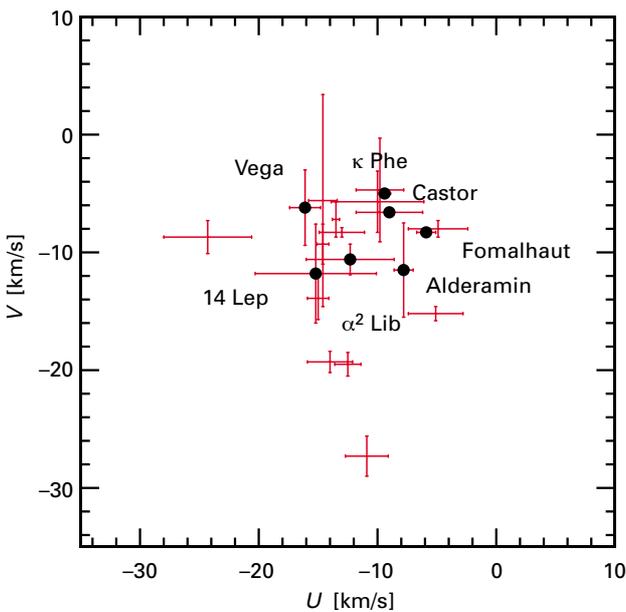


Abb. IV.19: Die Kandidaten der Castor-Bewegungsgruppe in einem Diagramm der galaktischen Geschwindigkeitskomponenten U und V .

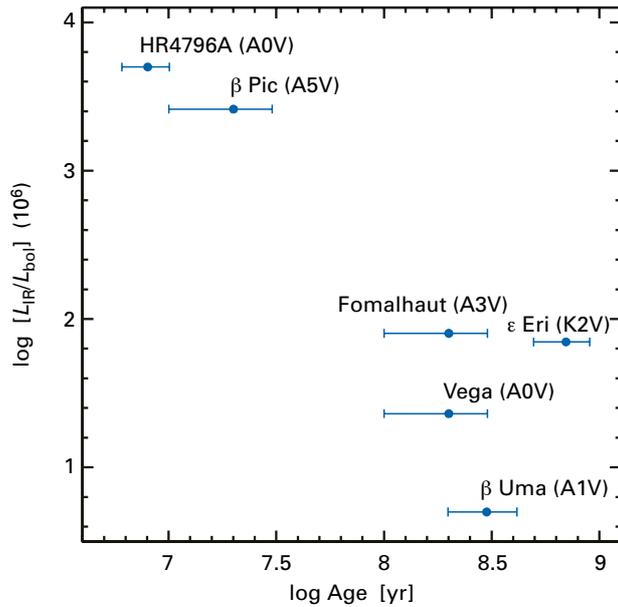


Abb. IV.20: Abnahme der Infrarotleuchtkraft mit zunehmendem Alter der Sterne.

emission ($H\alpha$) und im Röntgenbereich. Letztlich blieben aus der ursprünglich 44 Sterne umfassenden Gruppe nur noch 8 übrig, darunter Castor, Wega und Fomalhaut.

Zunächst wurde versucht, das Alter dieser Sterne mit Hilfe theoretischer Entwicklungswege im Farben-Helligkeits-Diagramm zu ermitteln. Diese Methode ist in diesem Fall jedoch sehr ungenau, weil der Anteil schwerer Elemente nicht bekannt ist. Hiermit ergab sich lediglich ein Mindestalter von 35 Millionen Jahren. Bereits 1993 hatten Astrophysiker versucht, das Alter von Wega und Fomalhaut direkt aus solchen Entwicklungsrechnungen abzuleiten. Sie kamen damals auf 400 bzw. 200 Millionen Jahre.

Die MPIA-Forscher wendeten indes eine neue Methode an, die sich bereits in anderen Fällen bewährt hatte: die Methode der Lithiumabreicherung (s. oben, »Neue Alterskala für Sternhaufen«). Sie beruht darauf, dass massearme Sterne Lithium zerstören, aber nicht bilden. Das heißt, der Lithiumanteil nimmt mit zunehmendem Alter ab. Außerdem hängt die Zerstörungsrate von der Masse ab: Je massereicher der Stern ist, desto schneller baut er Lithium ab. Unter den gleichaltrigen Mitgliedern eines Sternhaufens gibt es also eine Grenze zwischen den massereicheren Sternen, die das Lithium bereits gänzlich abgebaut haben, und den masseärmeren die noch nicht so weit sind. Mit zunehmendem Alter wandert diese Lithiumabreicherungsgrenze zu immer masseärmeren Mitgliedern, was als Kriterium für das Alter eines Haufens benutzt werden kann.

Angewandt auf die Castor-Bewegungsgruppe, ergibt diese Methode ein Alter von 200 ± 100 Millionen Jahre. Und so alt sollten dann auch Wega und Fomalhaut sein. Damit lässt sich nun überprüfen, ob die Staubmassen in den zirkumstellaren Scheiben mit zunehmendem Alter abnehmen. Wie Abb. IV.20 zeigt, scheint dies tatsächlich der Fall zu sein. Demnach lösen sich diese Scheiben innerhalb

von mehreren hundert Millionen Jahre auf. Dann erreichen sie einen Zustand, in dem Zerstörung und Nachlieferung sich die Waage halten und sich eine unveränderliche, massereiche Scheibe etabliert hat, wie sie heute bei der Sonne beobachtet wird.

Die Balkenstruktur im Innern der Milchstraße

Eine Reihe astronomischer Untersuchungen hat in den vergangenen zehn Jahren die Vermutung bestärkt, dass das Milchstraßensystem zum Typ der Balkenspiralgalaxien gehört. Da das Sonnensystem im Innern dieser Galaxie liegt, ist es jedoch äußerst schwierig, Struktur, Größe und Ausrichtung des Balkens zu ermitteln. Mit dem europäischen Astrometriesatelliten HIPPARCOS ist es gelungen, die Geschwindigkeitsverteilung vieler Sterne in der Umgebung der Sonne zu messen. Die Struktur dieser Verteilung lässt sich durch den Einfluss des galaktischen Balkens erklären, dessen Rotationsperiode demnach etwa halb so groß ist wie die Umlaufperiode der Sonne um das Galaktische Zentrum.

In dem auf Edwin Hubble zurückgehenden Klassifikationsschema unterscheidet man zwei Typen von Spiralgalaxien. Bei den normalen Typen schließen sich die Spiralarme unmittelbar an einen mehr oder weniger stark ausgeprägten Zentralbereich an. Bei den Balkenspiralen durchquert das Zentrum ein breiter Balken, der aus Gas und Sternen besteht. An ihm setzen dann fast senkrecht die Spiralarme an (Abb. IV.21). Bei Untersuchungen im optischen Spektralbereich findet man bei etwa 30 % aller Spiralgalaxien einen Balken. Wie sich diese Strukturen bilden, ist nicht abschließend geklärt. Offenbar stellen sie Störungen in der Scheibe dar, die sowohl durch äußere Einflüsse, wie die Gravitationswirkung einer nahen Galaxie, als auch durch Vorgänge im Innern entstehen können.

Die Balken haben einen starken Einfluss auf die Entwicklung einer Galaxie. Die Rotation des Balkens – als starre Struktur – ist derjenigen der Scheibe überlagert, was eine Umverteilung von Materie und Drehimpuls zur Folge hat. Konkret gelangt Materie aus äußeren Bereichen ins Zentrum. Dort können die großen Materieströme Sternentstehung auslösen oder auch ein zentrales Schwarzes Loch »füttern«.

Im Innern der Milchstraße fand man bei radioastronomischen Untersuchungen eine asymmetrische Geschwindigkeitsverteilung des neutralen Wasserstoffs. Sie ließ auf die Wirkung eines galaktischen Balkens schließen. Auch Analysen der Flächenhelligkeit im nahen Infrarot deuteten auf eine solche Struktur hin. Dieser Balken könnte dann verantwortlich sein für einen beobachteten Materiestrom in der Größenordnung von 0.01 Sonnenmassen pro Jahr, der aus den Außenbereichen kommend in einen Bereich von 500 Lichtjahren Abstand zum galaktischen Zentrum strömt. Die bisherigen Beobachtungen deuteten auf einen

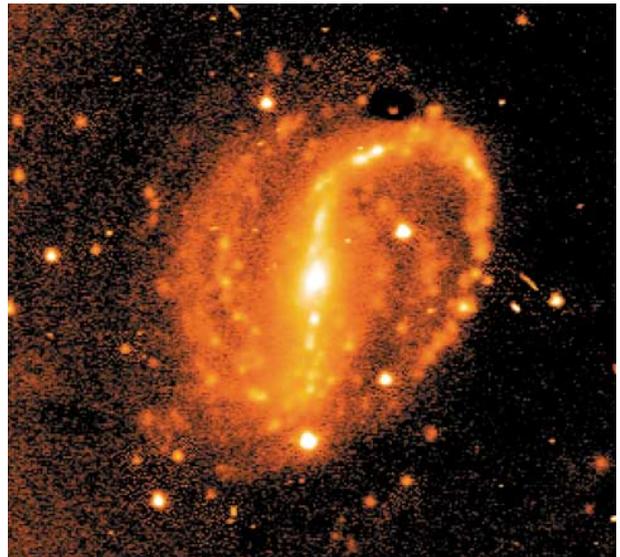


Abb. IV.21: NGC 7479, eine typische Balkenspiralgalaxie.

Balken hin, der sich über einen Bereich zwischen etwa 300 Lj und 10 000 Lj Abstand vom Zentrum der Milchstraße erstreckt.

Galaktischer Balken erklärt HIPPARCOS-Daten

Eine neue Möglichkeit, mehr über den galaktischen Balken zu erfahren, bot jetzt der Sternkatalog des Astrometriesatelliten HIPPARCOS. Astronomen des MPIA wählten aus dessen Daten einen Satz von über 14 000 Sternen der Sonnenumgebung aus, wobei Auswahlereffekte vermieden wurden, die systematische Fehler in der Analyse zur Folge hätten. HIPPARCOS hat für diese Sterne nur die Entfernungen und Eigenbewegungen, nicht aber die Radialgeschwindigkeiten bestimmt, daher kann der dreidimensionale Geschwindigkeitsvektor einzelner Sterne nicht rekonstruiert werden. Dennoch konnte mit Hilfe eines statistischen Verfahrens die Verteilung der Sterne über die drei Geschwindigkeitskomponenten u , v , und w ermittelt werden. (Das sind die Komponenten der Geschwindigkeit in Richtung zum galaktischen Zentrum, in Rotationsrichtung und in Richtung zum galaktischen Nordpol, das heißt senkrecht zur Scheibe.) Die Geschwindigkeiten sind auf das »Lokale Bezugssystem« (local standard of rest) bezogen, in dessen Ursprung die Sonne steht.

Für die etwa 6000 Sterne roter Farbe, die vorwiegend alt sind, zeigt diese Verteilung überraschenderweise eine deutliche Zweiteilung (Abb. IV.22). In dem oberen Bereich (rote Ellipse) befinden sich die meisten Sterne. Er enthält neben unserer Sonne auch einige bekannte Sternhaufen, wie die Plejaden und die Hyaden. Die Geschwindigkeiten dieser Sterne, die über den gesamten Himmel verteilt sind, weichen also nicht sehr von der unserer Sonne ab. Darunter erkennt man einen Bereich (blaue Ellipse), in dem sich nur 15 % aller Sterne befinden. Er zeichnet

sich durch eine im Mittel negative Geschwindigkeitskomponente u aus. Diese Sterne bewegen sich also weniger in Richtung des galaktischen Zentrums als von ihm weg.

In dieser Gruppe (blaue Ellipse) sind, im Gegensatz zu der Gruppe bei kleinen Geschwindigkeiten (rote Ellipse), Sterne blauer Farbe, also vorwiegend junge Sterne, nicht zu beobachten. Das schließt die übliche Erklärung solcher Strukturen als Anzeichen eines jungen Sternhaufens aus. Der Einfall eines Sternsystems aus dem Halo der Milchstraße ist ebenso sehr unwahrscheinlich und kann die beobachteten Metallhäufigkeiten in den betroffenen Sternen nicht erklären. Wie Astronomen des MPIA zeigen konnten, lässt sich das Diagramm ganz natürlich mit der Wirkung des galaktischen Balkens erklären.

Hierzu muss man sich mit den dynamischen Auswirkungen eines Balkens auf die Bewegung der Sterne beschäftigen. Sie treten besonders deutlich bei so genannten Resonanzen auf und lassen sich wie folgt verstehen. Die Sterne laufen auf epizyklischen Bahnen um das Zentrum (Abb. IV.23). Eine solche Bahn kann man durch zwei Komponenten darstellen: eine große kreisförmige um das Zentrum, beschrieben durch die Umlauffrequenz Ω_φ , und eine weitere, kleinere elliptische Bahn, deren Mittelpunkt auf dem großen Kreis entlang wandert. Sie bezeichnet man als Ω_r . Die Überlagerung dieser beiden Bewegungskomponenten führt zu einer Epizykelbahn. Nun kann es zwischen den Winkelgeschwindigkeiten dieser Bahnkomponenten und derjenigen des Balkens Ω_B zu Resonanzen kommen. Eine solche Resonanz ist die äußere Lindblad-Resonanz:

$$\Omega_B = \Omega_\varphi + \frac{1}{2} \Omega_r.$$

Ein Stern, dessen Umlaufparameter diese Bedingung erfüllt, läuft in Phase mit dem Balken um das Zentrum. Das heißt, nach jedem kompletten Umlauf auf seiner Ellipse ist der Stern bezüglich des Balkens wieder an der selben Stelle. Dadurch wird dieser Stern immer an der selben Position auf seiner Bahn durch die Gravitation des Balkens beeinflusst und auf eine andere Bahn geschoben. So kann er die

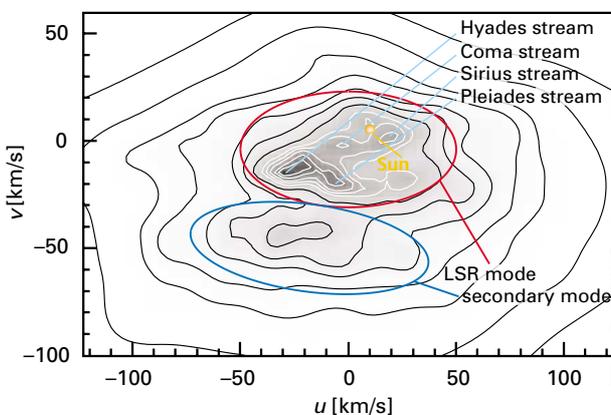


Abb. IV.22: Die mit HIPPARCOS ermittelte Geschwindigkeitsverteilung von 6000 roten Sternen der Sonnenumgebung. Die Position der Sonne ist bei $v = 5$ km/s und $u = 10$ km/s eingetragen.

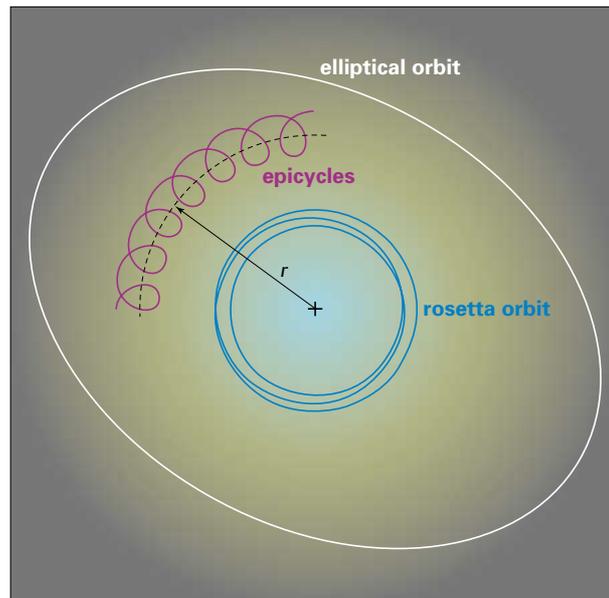


Abb. IV.23: Veranschaulichung der Epizykelbahnen von Sternen in Spiralgalaxien.

beobachtete hohe Geschwindigkeitskomponente u in Richtung des galaktischen Zentrums erhalten.

Die mit HIPPARCOS ermittelte Zweiteilung lässt sich qualitativ erklären, wenn die Bahn der Sonne etwas außerhalb der äußeren Lindblad-Resonanz liegt. In diesem Fall zeugt die Abreicherung der Sterne zwischen den beiden Bereichen (rote und blaue Ellipsen in Abb. IV.22) von Umlaufbahnen, die genau auf der äußeren Lindblad-Resonanz liegen. Die gemessene Geschwindigkeitskomponente v dieser Abreicherung von etwa -13 km/s deutet auf eine äußere Lindblad-Resonanz etwa 3000 Lj innerhalb der Sonnenbahn hin.

Um einige physikalische Parameter des galaktischen Balkens genauer zu bestimmen, wurde ein numerisches Modell berechnet. Hierin wurde berücksichtigt, dass die Geschwindigkeit der äußeren Lindblad-Resonanz, also der Grenzlinie zwischen den beiden Geschwindigkeitsbereichen, von vier Größen abhängt:

- der Entfernung der Sonne von der äußeren Lindblad-Resonanz,
- dem Winkel φ zwischen der Verbindungslinie galaktisches Zentrum–Sonne und der Längsachse des Balkens,
- der Rotationsgeschwindigkeit der Sterne um das galaktische Zentrum und
- der Form der Rotationskurve der Milchstraße.

Die numerischen Modelle gingen von einem Balken aus, der sich im Innern einer anfänglich achsensymmetrischen Scheibe bewegt, deren Materiedichte vom Zentrum nach außen exponentiell abnimmt. Im Rahmen vernünftiger Parameterwerte gab dieses Modell das beobachtete Geschwindigkeitsdiagramm der HIPPARCOS-Daten teilweise

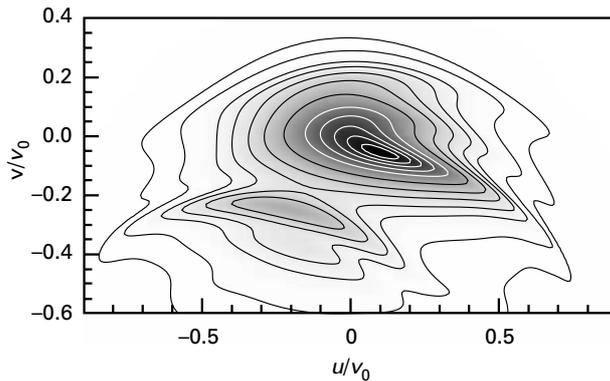


Abb. IV.24: Eines der am MPIA gerechneten Modelle, bei denen die Zweiteilung der Sternengeschwindigkeiten durch den Einfluss eines galaktischen Balkens erklärt wird.

sehr gut wieder (Abb. IV.24). Die besten Übereinstimmungen von Modell und Beobachtung ergaben sich für den Fall, dass die Sonne außerhalb der äußeren Lindblad-Resonanz umläuft. Dann wurden Modelle gerechnet, um die Winkelgeschwindigkeit des Balkens Ω_B sowie den Abstand der Sonne von der äußeren Lindblad-Resonanz, ΔR , zu ermitteln. Hierfür wurde der Winkel φ zwischen den heute akzeptierten Werten von 15 und 45 Grad variiert, und es wurden vier unterschiedliche Entfernungen der Sonne vom galaktischen Zentrum R_0 und entsprechende Umlaufgeschwindigkeiten v_0 angenommen. Hierbei zeigte es sich, dass die Werte für Ω_B und ΔR nicht allzu stark von diesen Parametern abhängen.

Für die heutigen Standard-Werte $R_0 = 8$ kpc (26 000 Lj) und $v_0 = 227$ km/s ergab sich eine Winkelgeschwindigkeit des Balkens von 53 ± 4 km s⁻¹/kpc, und die äußere Lindblad-Resonanz liegt bei 7.4 kpc (24 000 Lj) Abstand vom galaktischen Zentrum. Demnach müsste der Balken im Bereich der äußeren Lindblad-Resonanz mit einer Bahngeschwindigkeit von 392 km/s rotieren und wäre damit knapp doppelt so schnell wie dort umlaufenden Sterne.

Diese Simulationen belegen demnach, dass sich die mit HIPPARCOS beobachtete Geschwindigkeitsteilung der Sterne auf natürlich Weise durch die Schwerkraftwirkung des galaktischen Balkens erklären lässt. Die physikalischen Parameter dieser Struktur sollen zukünftig durch eine verbesserte Modellierung noch genauer ermittelt werden.

CADIS liefert Erkenntnisse zur Struktur der Milchstraße

Seit einigen Jahren arbeiten Astronomen des Instituts am Calar Alto Deep Imaging Survey, CADIS (s. Jahresbericht 1997, S. 18). Ziel dieses Langzeitprojekts, bei dem insgesamt eine Himmelsfläche von einem Drittel Quadratgrad in rund 40 Wellenlängenbereichen aufgenommen wird, ist die Suche nach den entferntesten, jüngsten Galaxien. Bei der automatischen Auswertung werden aber auch zahlreiche Sterne entdeckt und klassifiziert. Aus

diesem Datenmaterial ergeben sich mit bislang einzigartiger Empfindlichkeit Aussagen über die Struktur der Milchstraße und die Leuchtkraftfunktion der Sterne. In einem ersten Zwischenbericht findet das CADIS-Team eine Sternpopulation außerhalb des klassischen Bereichs der galaktischen Scheibe, in der so genannten »dicken« Scheibe. Außerdem widerlegen die Untersuchungen die Vermutung, dass die Anzahl der Sterne ab einer absoluten Helligkeit von etwa 12 mag abnimmt.

Die CADIS-Aufnahmen weisen neben dem großen Bildfeld zwei weitere entscheidende Vorteile auf: Zum einen haben die photometrischen Aufnahmen wegen der Vielzahl der verwendeten Farbfilter fast schon spektroskopische Qualität, und zum anderen werden wegen der langen Belichtungszeiten von mehreren Stunden auch sehr lichtschwache Objekte sichtbar. Die bereits vorhandenen Daten lassen sich daher nicht nur für die Suche nach den jüngsten Galaxien nutzen, sondern sie eignen sich auch ausgezeichnet für die Identifizierung und Klassifizierung von Sternen und damit zum Studium der Struktur unseres Milchstraßensystems.

Die Struktur unserer Galaxis

Moderne Modelle der Massenverteilung unserer Galaxis berücksichtigen mehrere Komponenten, die sich in ihrer Dynamik und im durchschnittlichen Alter ihrer Sterne voneinander unterscheiden. Demnach findet sich im Zentralbereich der abgeplattete zentrale Bulge (Verdickung) mit einem Durchmesser von 16 000 Lj, in dessen Zentrum der Kern mit einem Durchmesser von etwa 500 Lj liegt. An den Bulge schließt sich die Scheibe mit einem Durchmesser von etwa 100 000 Lj an. Sie enthält vorwiegend junge Sterne. Ihre Massendichte nimmt sowohl vom Zentrum radial nach außen als auch von der Zentralebene senkrecht nach oben und unten exponentiell ab.

In neuerer Zeit erkannte man, dass außer dieser dünnen Scheibe noch eine dicke Scheibe existiert. Sie besitzt eine ähnliche radiale Ausdehnung wie die dünne Scheibe, weist aber senkrecht zur Scheibenebene eine wesentlich größere Skalenhöhe von etwa 3000 Lj auf. Die Sterne hierin rotieren mit etwa 40 km/s langsamer als die der dünnen Scheibe und sie sind etwas älter. Man schätzt, dass die dünne Scheibe etwa zehnmals mehr Sterne enthält als die dicke. Viele Fragen sind hier aber noch ungeklärt. So wird über die Skalenhöhe dieser Komponente (Abfall der Sterndichte auf $1/e$), ihre absolute Sterndichte und auch über ihre Entstehung diskutiert.

Umgeben ist die Scheibe von einem nahezu sphärischen Halo mit einem Radius von etwa 70 000 Lj. Ihm gehören die Kugelsternhaufen und auch einzelne Sterne an. Darüber hinaus vermuten die Astrophysiker im Halo die Dunkle Materie, die möglicherweise zehnmals mehr Masse besitzt als Sterne, Gas und Staubnebel zusammen.

Klassifizierung von 300 Sternen

Die Aufnahmen der zwei Felder um 9^{h} und 16^{h} Rektasension wurden am 2.2-Meter-Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums mit dem Fokalreduktor CAFOS sowie am 3.5-Meter-Teleskop mit der Kamera MOSCA und der Nahinfrarotkamera Omega Prime gewonnen. Es entstanden Aufnahmen durch zehn Filter, für die Sternklassifikation reichten jedoch Aufnahmen in drei Filterbereichen um 461 nm Wellenlänge (blau), 649 nm (rot) und 815 nm (nahes Infrarot) aus. Die Belichtungszeiten betragen zwischen 30 Minuten und 8.5 Stunden. Da die Himmelsfelder bei hohen galaktischen Breiten liegen, ist Extinktion durch interstellaren Staub vernachlässigbar.

In den Aufnahmen der beiden Himmelsfelder finden sich etwa 10 000 Objekte. Es musste also zunächst ein Computerprogramm geschrieben werden, mit dem sich die Galaxien von den Sternen trennen lassen. Dies erfolgt auf Grund der Farbe und der Form (Sterne erscheinen punktförmig). Mit spektroskopischen Nachbeobachtungen von 245 willkürlich ausgewählten Himmelskörpern, darunter 55 Sternen, ließ sich die Zuverlässigkeit der Methode nachweisen: Nur eine Galaxie wurde irrtümlich als Stern eingestuft. Damit liegen die photometrischen Daten von 300 Sternen bis zur 23. Größenklasse vor – ein einmaliger Datensatz. Die Klassifizierung der Sterne erfolgte, indem die Spektren von Standardsternen aus einem Katalog als Referenz genommen und auf die bei CADIS verwendeten Filter übertragen wurden.

Auf diese Weise ließen sich rund 300 Sterne mit scheinbaren Helligkeiten im Roten zwischen 15.5 mag und 23 mag klassifizieren. Um die räumliche Verteilung der Sterne zu ermitteln, benötigt man ihre Entfernungen. Die ergeben sich, wenn man aus der gemessenen scheinbaren Helligkeit die absolute Helligkeit ableitet. Dieses Problem lässt sich auf folgende Weise lösen: Die Astronomen können davon ausgehen, dass es sich bei allen Objekten um Hauptreihensterne handelt. Für diese Sterne gilt eine ein-

deutige Relation zwischen der Farbe und der absoluten Helligkeit. Abb. IV.25 zeigt ein solches Farben-Helligkeits-Diagramm, wobei als Farbe die Helligkeitsdifferenz im blauen und roten Spektralbereich gewählt wurde. Hierbei ergibt sich eine Unsicherheit dadurch, dass diese Relation sich auf Sterne mit solarer Elementhäufigkeit bezieht. Da die blauen Sterne im Halo der Milchstraße im Allgemeinen weniger schwere Elemente enthalten als die Sonne, ist für sie eine Korrektur der Hauptreihe nötig. Diese besteht in einer Verschiebung zu schwächeren Helligkeiten um 0.75 Größenklassen (gepunktete Linie in Abb. IV.25).

Dünne und dicke galaktische Scheibe

Die aus den Farben gewonnenen absoluten Helligkeiten lassen sich nun in die Entfernungen umrechnen (Abb. IV.26). Man erkennt zwei Sternpopulationen, deren Grenze bei einem Farbindex (blau – rot) = 0.7 mag liegt. Bei den roten Sternen ($b - r > 0.7$ mag) handelt es sich um Objekte in der Scheibe der Milchstraße, die anderen Sterne befinden sich überwiegend im Halo. In den beiden Himmelsfeldern fanden sich zusammen 95 Halo- und 178 Scheibensterne. Das sind rund doppelt so viel Scheibensterne wie theoretisch erwartet.

Aus den Entfernungswerten lässt sich nun auch die Dichteverteilung der Sterne ermitteln. Dabei war zu berücksichtigen, dass die Sternzählung nur bis herab zu einer bestimmten Mindesthelligkeit vollständig ist. Nach dieser Korrektur ergab sich die Sterndichte in Abhängigkeit von der Höhe über der galaktischen Ebene. Betrachtet man zunächst nur alle Sterne der Scheibenpopulation ($b - r > 0.7$ mag), so erhält man eine Verteilung wie in Abb. IV.27. Da die nächsten Sterne im CADIS-Katalog immerhin 650 Lj entfernt sind, wurde der Datensatz um Sterne aus dem so genannten Fourth Catalogue of Nearby Stars (CNS 4) ergänzt. Er wurde am Astronomischen Rechen-Institut in

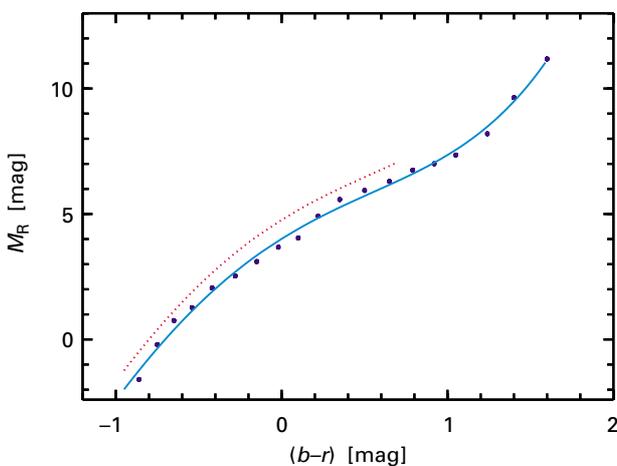


Abb. IV.25: Farben-Helligkeits-Diagramm für Sterne mit solarer (durchgezogene Linie) und untersolarer Häufigkeit an schweren Elementen.

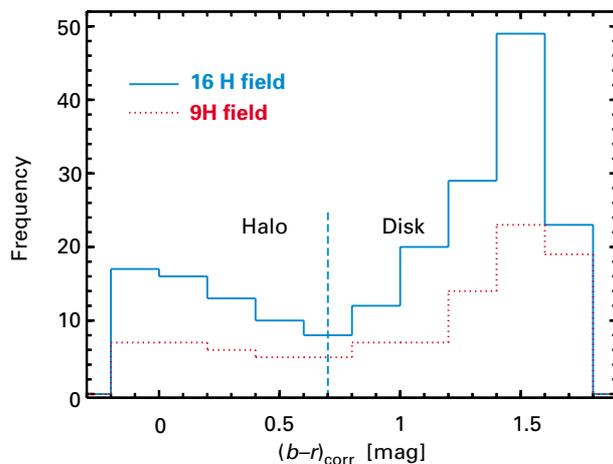


Abb. IV.26: Bei der Verteilung der Sterne nach ihren Farben zeigt sich eine Zweiteilung in Halo- ($b - r < 0.7$) und Scheibensterne ($b - r > 0.7$).

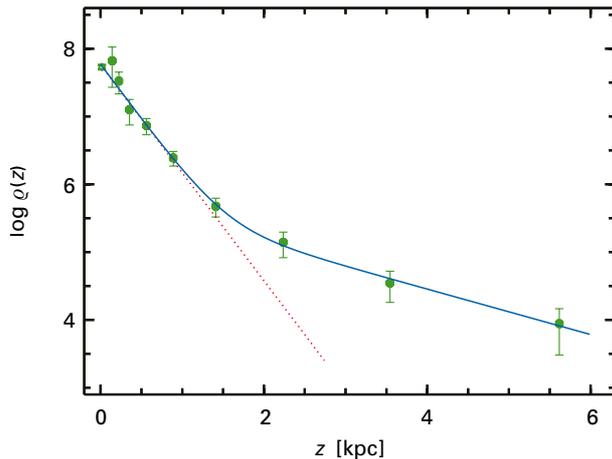


Abb. IV.27: Dichte der Scheibensterne in Abhängigkeit von der Höhe über der galaktischen Ebene im 9^h-Feld. Gestrichelte Linie: Anpassung für die dünne Scheibe; durchgezogene Linie: Anpassung für dünne und dicke Scheibe.

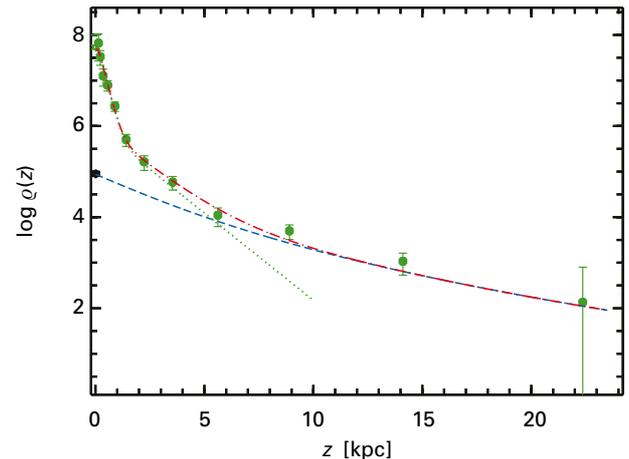


Abb. IV.28: Dichte aller Sterne in Abhängigkeit von der Höhe über der galaktischen Ebene im 9^h-Feld. Gepunktete Linie: Anpassung für die dünne Scheibe; gestrichelte Linie: de-Vaucouleurs-Funktion, strichpunktierte Linie: Summe der beiden Funktionen.

Heidelberg auf Grund von HIPPARCOS-Daten erstellt und enthält Sterne bis 65 Lj Entfernung von der Sonne.

Bei der Ermittlung der Sterndichte ergab sich die Möglichkeit, zwischen Scheiben- und Halosterne zu unterscheiden und die einzelnen Komponenten klarer zu differenzieren. Im ersten Schritt wurden nur die Scheibensterne betrachtet. Wie in Abb. IV.27 deutlich zu erkennen, gibt es in der Sterndichte zwei Bereiche: Bis zu einer Höhe von 5000 Lj bis 6500 Lj (1.5 kpc bis 2 kpc) lässt sich die Dichteverteilung mit einem Exponentialgesetz beschreiben (gepunktete Linie in Abb. IV.27). Daran schließt sich eine zweite Verteilung an, die einem Exponentialgesetz mit einer anderen Steigung folgt. Die durchgezogene Linie zeigt die Überlagerung beider Funktionen. Diese beiden Sternpopulationen kennzeichnen zwei Komponenten des Milchstraßensystems, die seit einiger Zeit diskutiert werden: die dünne und dicke Scheibe.

Die CADIS-Daten erlauben es nun, einige Parameter der dünnen und dicken Scheibe zu bestimmen. So ergibt sich die Skalenhöhe der dünnen Scheibe zu etwa 890 Lj, womit die MPIA-Forscher genau in dem derzeit diskutierten Bereich von 650 bis 1000 Lj liegen. Die Skalenhöhe der dicken Scheibe ergibt sich zu etwa 4200 Lj, was im Bereich heutiger Modelle liegt.

Der Halo

In einem zweiten Schritt wurden nun die Halosterne in die Analyse mit einbezogen. Abb. IV.28 zeigt die Dichteverteilung bis in eine Entfernung von 70 000 Lj oberhalb der Milchstraßenebene. Damit wurden Sterne bis in den Außenbereich des Halos aufgespürt. Die Daten deuten aber auch darauf hin, dass der Halo möglicherweise weniger Sterne enthält als bislang vermutet. Jedenfalls wurden bei der CADIS-Studie im Verhältnis

zur Anzahl der Halosterne in der Scheibe doppelt so viele Sterne gefunden wie von heutigen Modellen vorausgesagt wird.

Die drei Komponenten (dünne und dicke Scheibe, Halo) sind in Abb. IV.28 deutlich erkennbar und müssen durch drei unterschiedliche Verteilungsfunktionen beschrieben werden, was erneut die Existenz der dicken Scheibe als eigenständige Population unterstreicht. In Höhen zwischen 5000 und 15 000 Lichtjahren dominiert eindeutig die Sterndichteverteilung. Der Halo lässt sich zwischen 18 000 und 50 000 Lj ausgezeichnet durch ein klassisches de-Vaucouleurs-Profil beschreiben. Innerhalb derzeitiger Fehlergrenzen wäre aber auch ein Dichteabfall mit der dritten Potenz des Abstandes möglich. In diesem Fall lässt sich auch die räumliche Ausdehnung des Halos ermitteln. Als bester Fit ergibt sich ein ellipsoidischer Halo mit einem Achsenverhältnis von etwa 2:3.

Die Leuchtkraftfunktion

Eine zentrale astronomische Größe ist die Leuchtkraftfunktion. Sie beschreibt die Anzahl der Sterne pro Leuchtkraftintervall und bildet damit die empirische Grundlage für die Massenfunktion (Anzahl der Sterne pro Massenintervall) und für die Entstehungsrate der Sterne. Der Verlauf der Leuchtkraftfunktion ist im Bereich der schwächsten Sterne am ungenauesten bekannt. Insbesondere ist es heute umstritten, ob die Anzahl der Sterne ab einer absoluten Größe von 12 mag tatsächlich abnimmt, wie es beispielsweise erst 1998 eine Studie mit dem Weltraumteleskop Hubble ergeben hat. Auch auf diese Frage konnte die CADIS-Untersuchung eine Teilantwort geben.

Um eine homogene und vollständige Gruppe von Sternen für die Analyse heranziehen zu können, wählten die Forscher nur Mitglieder der dünnen Scheibe in Entfernun-

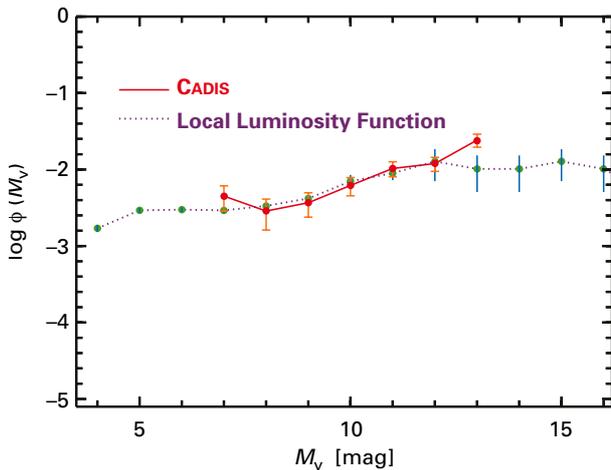


Abb. IV.29: Leuchtkraftfunktion der Sterne aus der CADIS-Studie (durchgezogene Linie) und derjenigen sonnennaher Sterne aus dem CNS 4 (gepunktet).

gen bis zu 5000 Lj aus. Die aus beiden Himmelsfeldern ermittelte Leuchtkraftfunktion zeigt Abb. IV.29. Im Bereich der Sterne 8. bis 12. Größe zeigt sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit den Sternen aus dem CNS 4 (gepunktete Linie), was das Vertrauen in die CADIS-Daten und deren Auswertung stärkt. Dann aber steigt die aus den

CADIS-Daten abgeleitete Verteilung im Gegensatz zu der der CNS-4-Sterne zur 13. Größe hin weiter an. Dieses Ergebnis steht auch im Widerspruch zu der erwähnten Studie mit dem HST. Im Bereich schwacher Sterne kann man wohl den gemeinsam aus der CADIS-Studie und dem HIPPARCOS-Katalog ermittelten Datensatz als die derzeit weltbeste Leuchtkraftfunktion bezeichnen.

Die beobachtete Leuchtkraftfunktion lässt sich über eine empirische Relation auch in eine Massenfunktion umrechnen. Dann ergibt sich für einen Bereich von 0.2 bis 1.1 Sonnenmassen, dass die Anzahl der Sterne pro Massenintervall etwa umgekehrt proportional zur Masse zunimmt.

Erst der Anfang

Diese Analyse basiert auf einem Viertel aller CADIS-Daten. Letztlich hoffen die Forscher, über einen Katalog von 1200 Sternen bis zu einer scheinbaren Helligkeit im Roten von 23.5 mag zu verfügen. Bis dahin sollten dann auch Standardspektren für Hauptreihensterne mit geringer Elementhäufigkeit vorliegen, damit sich die Halosterne besser klassifizieren lassen. Dann sollten sich Fragen nach den Skalenhöhen der dünnen und dicken Scheibe oder der Form des Halos genauer beantworten lassen. Und insbesondere sollten sich Leuchtkraft- und Massenfunktion mindestens bis zur 14. Größe ermitteln lassen.

IV.2 Extragalaktische Astronomie

Zufallsdurchmusterung mit ISO liefert bedeutenden Galaxienkatalog

Mit der am MPIA entwickelten Kamera ISOPHOT wurde auf dem Infrarotsatelliten ISO im Rahmen einer Zufallsdurchmusterung ein Teil des Himmels im fernen Infrarotbereich erforscht. Aus diesem einzigartigen Datensatz werden die Astronomen in den kommenden Jahren einen Katalog mit voraussichtlich über tausend Galaxien und einer noch unbekanntem Zahl kalter Staubwolken in der Milchstraße erstellen. Im Berichtsjahr konnte ein erster Teilkatalog mit 115 Galaxien herausgegeben werden. Es zeigte sich, dass in praktisch allen Spiralgalaxien große Mengen an kaltem Staub existieren, die bislang unentdeckt geblieben waren. Die Masse dieses Staubes beträgt 10^6 bis 10^9 Sonnenmassen. Das ist um Faktoren zwei bis zehn mehr als man auf Grund der Beobachtungen mit dem Satelliten IRAS abgeschätzt hatte. Mit ISO ist man damit einer bedeutenden Staubkomponente auf die Spur gekommen.

Das am 17.11.1995 gestartete europäische Infrarotobservatorium ISO arbeitete bis April 1998 fehlerfrei. In den fast 29 Monaten Beobachtungszeit haben Astronomen mit ISO etwa 26000 Einzelbeobachtungen durchgeführt. ISOPHOT, eines der wissenschaftlichen Instrumente an Bord, war unter der Leitung des MPIA in Zusammenarbeit mit der Dornier Satellitensysteme GmbH, der NASA und der Firma Carl Zeiss gebaut worden. Anders als sein Vorgänger IRAS beobachtete ISO gezielt ausgewählte Infrarotquellen. Außerdem wurde mit ISOPHOT der überdeckte Wellenlängenbereich bis auf $240 \mu\text{m}$ erweitert, die Nachweismempfindlichkeit um das Hundertfache gesteigert, und erstmals war auch hochauflösende Spektroskopie und Polarimetrie sehr schwacher Quellen möglich.

Erster Galaxienkatalog

Da mit ISO einzelne Objekte untersucht wurden, musste das Instrument zwischen den Beobachtungen von einer Himmelsposition zur nächsten geschwenkt werden. Um auch die Schwenkzeit nicht ungenutzt zu lassen, wurde die C200-Kamera des ISOPHOT während der Schwenks angeschaltet. Dadurch ergaben sich etwa drei Bogenminuten breite Scans über den gesamten Himmel in dem bis zur ISO-Mission noch unerforschten fernen Infrarotbereich bei $170 \mu\text{m}$ (s. Jahresbericht 1997, S. 29). Diese Technik ermöglicht es, sowohl punktförmige als auch ausgedehnte Quellen nachzuweisen. Auf diese Weise ließen sich über die gesamte Mission hinweg bei 12000 Schwenks etwa

550 Stunden, entsprechend fünf Prozent der gesamten Beobachtungszeit, zusätzlich nutzen. Im Verlaufe der ISO-Mission überstrich der Satellit am Himmel eine Länge von $150\,000$ Grad, was einer Himmelsbedeckung von ca. 15 % entspricht.

Zur Aufnahme eines Objekts in den Galaxienkatalog waren unter anderen drei Auswahlkriterien zu erfüllen: Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis musste in allen Pixeln des Detektors größer als 5 sein, das Objekt musste mindestens 15 Grad von der staubreichen galaktischen Scheibe entfernt stehen, und es ließ sich einer Galaxie aus anderen Katalogen zuordnen.

Das Ergebnis ist ein 115 Galaxien umfassender Katalog, wobei alle Galaxien mit Rotverschiebungen größer als 0.005 (entsprechend Entfernungen von mehr als etwa 100 Millionen Lichtjahre) punktförmig erscheinen. Alle Objekte sind identifiziert und die genauen Positionen, Entfernungen (Rotverschiebungen) und optischen Helligkeiten sind bekannt. Zusätzlich ließen sich jetzt mit ISOPHOT die absoluten Strahlungsintensitäten bei $170 \mu\text{m}$ Wellenlänge bestimmen. Dieser bisher einmalige Datensatz erlaubt weitreichende Aussagen über kalten Staub in Galaxien.

Kalter Staub in Spiralgalaxien

In den Spiralgalaxien, zu denen auch unser Milchstraßensystem gehört, liegen rund 90 % der gesamten sichtbaren Materie in Form von Sternen vor. Das interstellare Gas macht knapp 10 % aus, während der Staub lediglich 0.1 % beisteuert. Dennoch ist die Staubkomponente von großer Bedeutung, da sie sehr effektiv zur Energieabstrahlung der Galaxie beiträgt: Staubteilchen absorbieren das kurzwellige Sternlicht, erwärmen sich dadurch und strahlen im langwelligen Infrarotbereich. Dadurch schirmt der Staub das Innere großer Wolken vor der energiereichen Sternstrahlung ab, und im Schutz des absorbierenden Staubes können sich Moleküle bilden. Im Innern großer Molekülwolken, das ist seit längerem bekannt, bilden sich neue Sterne.

Mit bisherigen Infrarotteleskopen war jedoch nur der relativ warme Staub mit Temperaturen oberhalb von etwa 20 Kelvin erkennbar. Mit ISO wurde erstmals Staub mit Temperaturen bis herunter zu etwa 12 Kelvin sichtbar. Erst kürzlich gelang es Astronomen des MPIA mit ISOPHOT, kalten Staub in der Andromeda-Galaxie und in deren Begleitgalaxie NGC 205 nachzuweisen (s. Jahresbericht 1998, S. 68). Auch in einigen wenigen, sehr nahen Galaxien ließ sich diese bis dahin unbekannte Staubkomponente nachweisen. Unklar war aber, ob diese kühle Materie nur in wenigen Galaxien vorhanden ist, oder ob sie eher

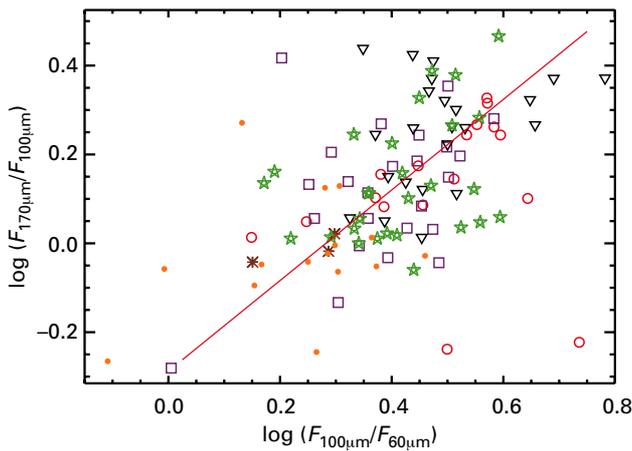


Abb. IV.30: Das Farbdiagramm zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen der Emission von warmem und der von kaltem Staub. Alle Arten von Spiralgalaxien verhalten sich gleich: offene Sterne = normale Spiralgalaxien, offene Kreise = Typ Sa, Dreiecke = Typ Sab, Quadrate = Sb, Sterne = Irreguläre, Punkte = nicht klassifiziert.

zum »normalen Inventar« gehört. Das Ergebnis der Zufallsdurchmusterung gibt hierauf eine klare Antwort: Etwa die Hälfte aller registrierten Galaxien enthält signifikante Staubmengen mit Temperaturen unterhalb von 20 K, bei der anderen Hälfte ließ sich etwas wärmerer Staub nachweisen.

Mit den Daten lässt sich ein Farbdiagramm erstellen, in dem man das Verhältnis der Flüsse von 170 μm /100 μm (kalter Staub) gegen das von 100 μm /60 μm (warmer Staub) aufträgt (Abb. IV.30). Trägt man beide Größen logarithmisch auf, so erhält man einen linearen Zusammenhang etwa mit der Steigung 1. Das heißt, das Intensitätsverhältnis der Strahlung von kaltem und warmem Staub bleibt konstant, während die Intensitäten selbst innerhalb eines Faktors 8 variieren.

Interessanterweise erfüllen offenbar alle Typen von Spiralgalaxien diese Relation gleichermaßen – ganz anders als bei kürzeren Wellenlängen. Dort hatte sich 1986 insofern eine deutliche Trennung gezeigt, als Balkenspiralgalaxien bei 25 μm Wellenlänge eine stärkere Emission zeigen als normale Spiralgalaxien. Dies wurde auf eine durch die Balkenstruktur erhöhte Sternentstehungsrate zurückgeführt. Es ist demnach denkbar, dass die bei 170 μm strahlende, kalte Staubkomponente in allen Galaxien in etwa gleichem Maße vorhanden ist, während die Menge des wärmeren Staubes mit der aktuellen Sternentstehungsrate zusammenhängt.

Aus den in Abb. IV.31 gezeigten Messdaten lässt sich mit einigen plausiblen Annahmen über das physikalische Verhalten der Staubteilchen eine Temperaturverteilung des Staubes ermitteln. Es ist eine verhältnismäßig schmale Verteilung zwischen 15 und 25 K. Damit ist die bis vor kurzem noch strittige Frage gelöst: Alle Spiralgalaxien enthalten eine bedeutende Komponente an kaltem Staub. Wie groß ist nun deren Anteil?

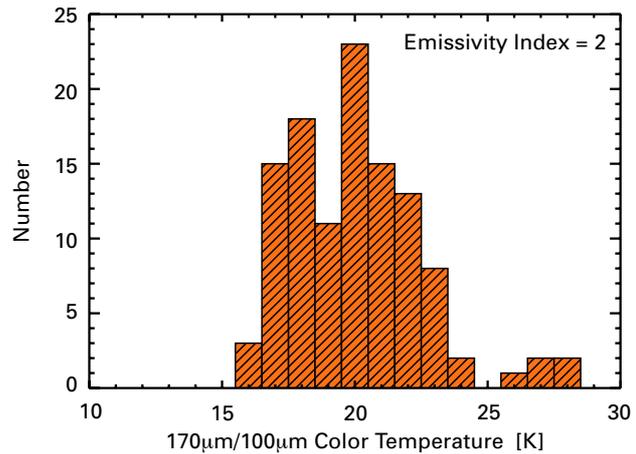


Abb. IV.31: Temperaturverteilung des Staubes in den verschiedenen Galaxien.

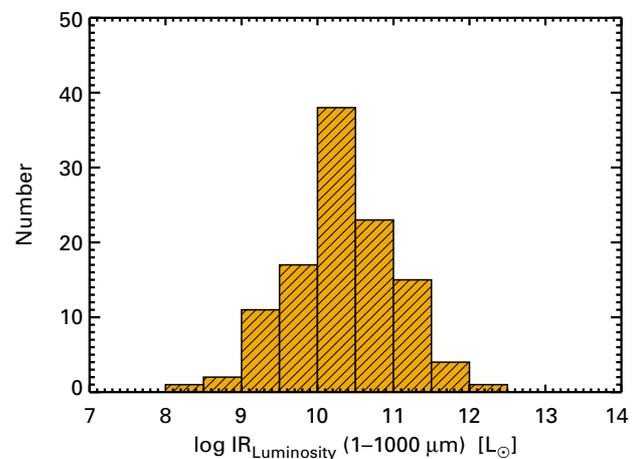


Abb. IV.32: Infrarotleuchtkräfte des Staubes in den verschiedenen Galaxien.

Unter der Annahme von thermischer Emission lässt sich mit dem Planckschen Strahlungsgesetz die Gesamtleuchtkraft des kalten Staubes für den Wellenlängenbereich vom Infrarot- bis zum Millimeterbereich (1 bis 1000 μm) berechnen (Abb. IV.32). Man erhält Werte zwischen 10^9 und 10^{12} Sonnenleuchtkräfte. Damit reichen die leuchtkräftigsten Objekte an den Bereich der ultraleuchtkräftigen Infrarotgalaxien (Ultra Luminous Infra-Red Galaxies, ULIRGs) heran, deren Gesamtleuchtkraft vom Infraroten dominiert wird.

Aus den Leuchtkräften lassen sich auch die Massen ausrechnen (Abb. IV.33). Sie umspannen einen Bereich von 10^6 bis 10^9 Sonnenmassen. Das ist um Faktoren zwei bis zehn mehr als man auf Grund der Beobachtungen mit dem Satelliten IRAS abgeschätzt hatte. Mit ISO ist man also einer bedeutenden Staubkomponente auf die Spur gekommen. Auch in der Massenverteilung zeigt sich kein Unterschied zwischen normalen Spiralgalaxien und Balkenspiralen. Lediglich zwei Galaxien mit weniger als 10^7 Sonnenmassen treten hervor – es handelt sich um Zwerggalaxien.

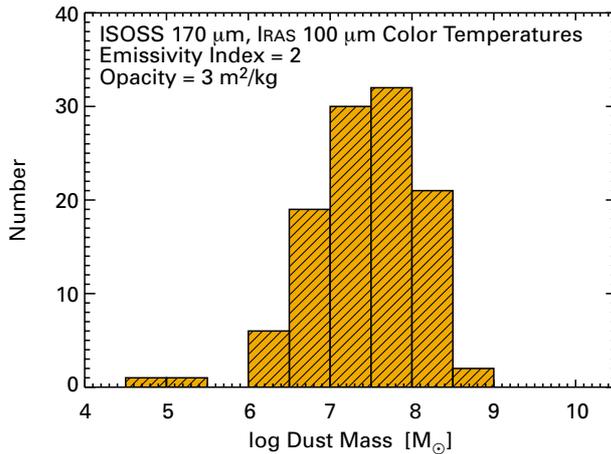


Abb. IV.33: Massenverteilung des Staubes in den verschiedenen Galaxien.

Für etwa die Hälfte der Galaxien in dem ISOPHOT-Katalog existieren bereits Radiobeobachtungen, aus denen sich die Massen des molekularen Wasserstoffgases ableiten lassen. Damit lässt sich für diese Objekte das Gas-zu-Staub-Verhältnis bestimmen. In der Milchstraße beträgt dieser Wert 160. Aus den IRAS-Daten hatten sich für andere Spiralgalaxien sehr hohe Werte zwischen 500 und 2000 ergeben, die man sich nicht erklären konnte. Jetzt ist klar: IRAS hatte einen großen Teil der Staubemission gar nicht erfasst. Die neuen ISOPHOT-Daten führen nun auf eine breite Verteilung des Gas-zu-Staub-Verhältnisses mit Werten zwischen 10 und 1000. Am häufigsten aber ist etwa der Wert 250. Das passt im Rahmen der Unsicherheiten gut zu dem »kanonischen«, für das Milchstraßensystem geltenden Wert. Wenn dieser Wert auch in anderen Spiralgalaxien gilt, eröffnet dies die Möglichkeit, zukünftig aus den gemessenen Ferninfrarotflüssen die Gasmassen der Galaxien abzuschätzen. Dies wurde zwar in der Vergangenheit bereits auf diese Weise praktiziert, allerdings ohne zu wissen, ob der eingesetzte Wert für das Gas-zu-Staub-Verhältnis in anderen Galaxien überhaupt gilt. Die neuen ISO-Daten schaffen jetzt erstmals Vertrauen in dieses Verfahren.

Dennoch ist die breite Streuung der Daten bemerkenswert und wahrscheinlich nicht auf experimentelle Unsicherheiten allein zurückzuführen. Vielmehr könnte das Gas-zu-Staub-Verhältnis mit der chemischen Zusammensetzung der Materie variieren. So wird vermutet, dass um so mehr Gas zu Staub auskondensiert, je höher der Anteil an schweren Elementen ist. Denkbar wäre auch, dass das Gas-zu-Staub-Verhältnis von der Sternentstehungsrate in der Galaxie abhängt.

Dieser ISOPHOT-Punktquellenkatalog ist erst der Anfang. In seiner endgültigen Form wird er wahrscheinlich über tausend Galaxien umfassen, so dass sich eine Reihe von Frage systematisch angehen lassen. Gleichzeitig wird die Gruppe am MPIA in Zusammenarbeit mit Astronomen aus Budapest und Helsinki die Zufallsdurchmusterung nach leicht ausgedehnten Quellen absuchen. Bei ihnen handelt es sich um sehr kalte Staubwolken, prästellare

Kerne, Globulen und andere Objekte in unserer Milchstraße. Dieser Katalog wird eine Fülle von Informationen über junge Sternentstehungsgebiete beinhalten.

Wenn Zwerggalaxien ihr Gas verlieren

Zwerggalaxien sind unauffällige Sternsysteme. Edwin Hubble kannte sie noch gar nicht, als er seine Galaxienklassifikation vornahm. Sie sind nur einige tausend Lichtjahre groß, ihre Masse beträgt 10^7 bis 10^{10} Sonnenmassen, und sie sind wegen ihrer geringen Flächenhelligkeit nur schwer nachweisbar. Die bekanntesten Beispiele sind die Magellanschen Wolken und M 32, ein Begleiter des Andromeda-Nebels. Lange Zeit war unklar, warum Zwergsysteme in dichten Galaxienhaufen durchschnittlich weniger Gas enthalten als solche in schwach ausgeprägten Haufen. Eine theoretische Studie am MPIA belegt jetzt: Aus den meisten Zwerggalaxien fegt das heiße intergalaktische Medium das interstellare Gas innerhalb von wenigen Milliarden Jahren heraus.

Zwerggalaxien sind aus mehreren Gründen interessante Forschungsobjekte. Es gilt heute als sicher, dass es wesentlich mehr Zwerggalaxien als große Galaxien gibt. Ihr Anteil an der Gesamtmasse im Universum ist hingegen wegen ihrer schwierigen Nachweisbarkeit unbekannt. Bekannt ist auch, dass es zwei Arten von Zwerggalaxien gibt: irregulär geformte, die viel Gas enthalten und elliptische, die so gut wie kein Gas aufweisen. Dies ist ähnlich wie bei ihren massereichen Gegenstücken, den Spiral- und elliptischen Galaxien. Interessanterweise bezieht sich bei den Zwerggalaxien dieser morphologische Unterschied nur auf das interstellare Gas. Beobachtungen haben nämlich ergeben, dass sich elliptische und irreguläre Zwerggalaxien in der Verteilung ihrer Sterne sehr ähnlich sind. Dies lässt auf einen möglicherweise gemeinsamen Ursprung dieser beiden Typen von Zwerggalaxien schließen.

Wodurch die zwei Klassen entstehen, war das Thema einer mehrjährigen Studie der Theoriegruppe am Institut. Da Zwerggalaxien ein wesentlich geringeres Gravitationspotential besitzen als ihre massereichen Pendanten, prägen Supernovae die Zwergsysteme wesentlich stärker. Diese energiereichen Explosionen verwirbeln das interstellare Gas und führen zu dem diffusen Aussehen der irregulären Zwerggalaxien, wie die Gruppe 1998 nachweisen konnte (Jahresbericht 1998, S. 24).

Allerdings enthielten die elliptischen Zwerggalaxien in den Simulationen auch nach zehn Milliarden Jahren noch sehr viel Gas, während die beobachteten Systeme über keine nennenswerten Gasvorräte mehr verfügen. Es tauchte nun die Vermutung auf, dass Zwergellipsen ursprünglich Zwergirreguläre gewesen sind, die ihr Gas verloren haben. Schon vor mehreren Jahren hatte man herausgefunden, dass Zwerggalaxien in dichten Galaxienhaufen im Durchschnitt weniger Gas enthalten als solche in dünn besiedel-

ten, weit ausgedehnten Haufen – ein Befund, der genau so auch auf massereiche Galaxien zutrifft: In dichten Galaxienhaufen verlieren große Galaxien Gas, indem sie sich mit hoher Geschwindigkeit durch das intergalaktische Medium bewegen. Hierbei übt das intergalaktische Gas einen hohen Druck auf das interstellare Gas im Innern der Galaxie aus und fegt es förmlich aus ihr heraus. Da Zwerggalaxien ein viel geringeres Gravitationspotential besitzen als ihre großen Schwestern, sollte dieser Vorgang des »ram pressure stripping« bei ihnen noch effektiver vor sich gehen. Wie groß der Einfluss eines solchen intergalaktischen Windes auf die Entwicklung von Zwerggalaxien ist, wollten Theoretiker des MPIA zusammen mit Kollegen von der Universität Tokio in einer numerischen Simulation herausfinden.

Zwerggalaxien im Teilchenwind

Heutige Modelle zur Galaxienentstehung gehen davon aus, dass im frühen Universum das Gas im Innern der Zwerggalaxien sehr heiß war. Zwei Ursachen kommen hierfür in Frage: andere junge Galaxien mit starker Sternentstehung, die intensive UV-Strahlung aussandten, sowie Supernovae, die durch UV-Strahlung und Teilchenwinde das umgebende Medium aufheizten. Für die Modelle ist die Ursache jedoch unerheblich. Entscheidend ist die generelle Annahme, dass die Zwerggalaxien ursprünglich im Innern heißes Gas enthielten, das ein ausgedehnter, massereicher Halo aus Dunkler Materie zusammenhielt. Die Halos aus Dunkler Materie lassen sich auf Grund ihrer Schwerkraftwirkung nachweisen (Jahresbericht 1997, S. 73). Sie stellen in den Zwerggalaxien typischerweise 95 bis 99 % der gesamten Materie und dominieren damit das dynamische Verhalten dieser Systeme. Die räumliche Dichteverteilung der Halos wurde durch ein ebenfalls am MPIA erstelltes Modell dargestellt. Weiter wurde angenommen, dass sich das heiße Gas im Innern entsprechend seiner Temperatur im hydrostatischen Gleichgewicht befindet, was auch die Annahme einer anfänglich sphärisch symmetrischen Verteilung rechtfertigt.

Für die Simulationen wurden drei physikalische Größen innerhalb realistischer Grenzen variiert: Erstens die Geschwindigkeit, mit der sich eine Urzwerggalaxie durch das intergalaktische Medium bewegt – für sie wurden die zwei Werte 500 km/s und 1000 km/s angenommen. Zweitens die Dichte des 10^7 K heißen, intergalaktischen Mediums – sie wurde zwischen 10^{-3} und 10^{-5} Teilchen pro Kubikzentimeter gewählt. Und drittens die Masse des Halos aus Dunkler Materie – sie wurde zwischen 10^6 und 10^{10} Sonnenmassen variiert.

Ob bei der Bewegung durch das intergalaktische Medium das interstellare Gas aus dem Innern einer Zwerggalaxie herausgefegt wird oder nicht, hängt davon ab, ob der beim Zusammenstoß der beiden Medien entstehende Staudruck stärker ist als die gravitativen Kräfte, die das Gas zusammenhalten. Bereits eine einfache analytische Abschät-

zung legte den Verdacht nahe, dass sämtliche Galaxien mit bis zu 10^9 Sonnenmassen innerhalb weniger Milliarden Jahre ihr Gas vollständig verlieren.

Das Problem wird durch Instabilitäten kompliziert, die in der Stoßzone zwischen intergalaktischem und interstellarem Medium auftreten. Zunächst entstehen dort so genannte Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten. Das sind Gasflüsse, die, konvektiven Strömungen gleich, an der Grenzschicht zweier sich gegeneinander bewegender Flüssigkeiten oder Gase auftreten. Aus dem einen der beiden Medien kommend, durchdringen sie die Grenzschicht und tragen ganz wesentlich dazu bei, dass Gas aus dem Innern einer Zwerggalaxie in den Außenraum transportiert wird. Andererseits kann auch Gas, das auf der windzugewandten Seite der Galaxie aus ihr herausgerissen wird, um diese herumströmen und auf der Rückseite wieder ins Innere zurückfließen. Um diese Prozesse mit einzubeziehen, wurde das »gas stripping« beim Durchgang einer Zwerggalaxie durch das intergalaktische Medium numerisch modelliert.

Abb. IV.34 zeigt eine solche Simulation am Beispiel einer Galaxie mit 10^7 Sonnenmassen, die sich mit 1000 km/s durch ein intergalaktisches Medium mit einer Dichte von 10^{-4} cm⁻³ bewegt. Die Zeitspanne zwischen erstem und letztem Bild beträgt 90 Millionen Jahre, wobei in der linken Spalte die Dichteverteilung und in der rechten die Druckverteilung gezeigt ist. Die Pfeile in den Abbildungen der rechten Spalte geben die Richtung des Gasflusses an.

Wenn intergalaktisches und interstellares Gas aufeinander treffen, breitet sich auf der windzugewandten Seite eine Schockwelle ins Innere der Galaxie aus, die das darin befindliche Gas zunächst komprimiert. Gleichzeitig entsteht auf der windabgewandten Seite ein Rückschock, der in das intergalaktische Medium wandert. Nach etwa 40 Millionen Jahren (drittes Bild) bilden sich an der Grenzschicht Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten aus. Das interstellare Gas wird nun durch den Staudruck des intergalaktischen Mediums aus der Galaxie herausgedrückt, wobei die Instabilitäten zu diesem Prozess noch beitragen. Auch Rayleigh-Taylor-Instabilitäten treten auf (z.B. bei $R = 0$, $z = 0.5$), entwickeln sich aber nicht sehr stark, weil sie durch das starke Gravitationsfeld der Galaxie unterdrückt werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass am Ende der Simulation das interstellare Gas vollständig aus der Galaxie herausgefegt ist.

Die zweite Simulation (Abb. IV.35) zeigt die selben Verhältnisse, lediglich die Galaxienmasse wurde auf 10^{10} Sonnenmassen erhöht. Hier beträgt die Zeitspanne etwa drei Milliarden Jahre. Anfänglich gleichen sich die Verhältnisse, doch da das Gravitationspotential in diesem Fall stärker ist, ist auch der zentrale Druck des interstellaren Gases höher, und es hält dem Staudruck besser stand. Zunächst tritt nur eine leichte Abreicherung des interstellaren Gases durch einsetzende Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten ein. Das Gas im Innern wird aber komprimiert und reagiert darauf, indem es sich seitlich (senkrecht zur Strömung) ausdehnt (drittes Bild). Dadurch erhöht sich die Windwiderstandsfläche, wodurch die Galaxie nun doch ver-

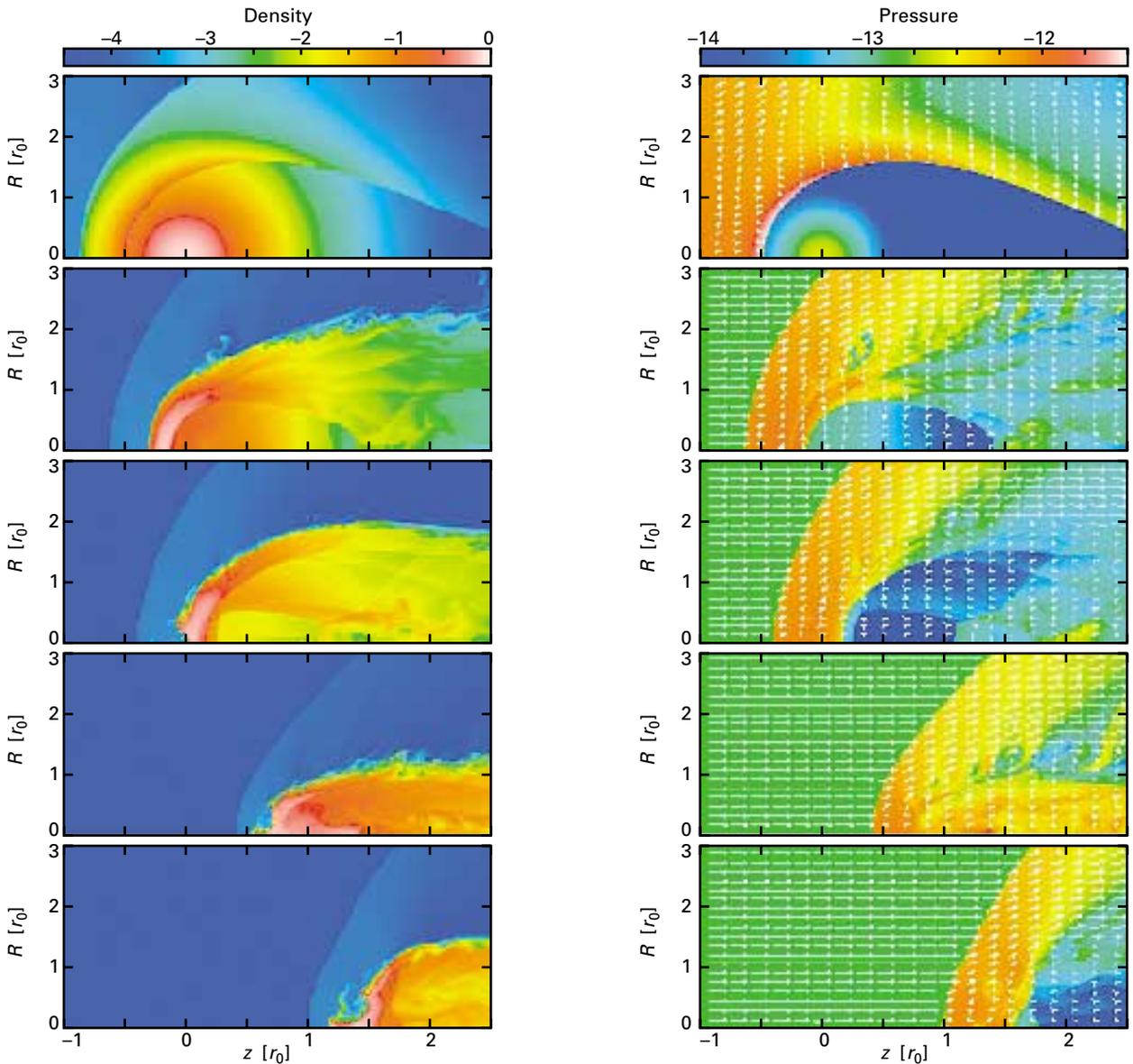


Abb. IV.34: Zeitliche Entwicklung einer Zwerggalaxie mit 10^7 Sonnenmassen, die sich mit 1000 km/s durch ein intergalaktisches Medium mit einer Dichte von 10^4 cm^{-3} bewegt. Links ist die Dichte, rechts der Druck und die Gasbewegung gezeigt. Die Zeitschritte sind: 5.6×10^6 , 2.9×10^7 , 4.6×10^7 , 7.4×10^7 und 9.6×10^7 Jahre.

mehrt Materie verliert. Außerdem entstehen Rayleigh-Taylor-Instabilitäten. Diese führen stromabwärts zu dem bereits erwähnten Rückstrom des Gases ins Innere der Galaxie. Dennoch verliert die Galaxie im Laufe weniger Milliarden Jahre rund drei Viertel ihres Gases.

Wie sich der Gasgehalt der Zwerggalaxien in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, der Gasdichte des intergalaktischen Mediums und der Galaxienmasse entwickelt, zeigt Abb. IV.36. Man erkennt, dass alle Galaxien mit bis zu 10^8 Sonnenmassen ihren gesamten Gasvorrat

innerhalb von ein bis zwei Milliarden Jahren einbüßen. Bei massereicheren Galaxien hängt die Entwicklung von ihrer Geschwindigkeit und der Dichte des intergalaktischen Mediums ab.

In vielen Galaxienhaufen ließ sich mit Hilfe von ROSAT-Aufnahmen die mittlere Dichte des heißen intergalaktischen Gases ermitteln. Ein gutes Beispiel hierfür ist der Coma-Haufen. Hier beträgt die Gasdichte $3 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$, während die mittlere Geschwindigkeitsdispersion der Galaxien bei 10^3 km/s liegt. Nach den Simulationen sollten im Coma-Haufen alle Zwerggalaxien innerhalb weniger Milliarden Jahre ihr gesamtes Gas verloren haben. Tatsächlich findet man die gasarmen Zwergellipsen in den Haufen und die massereicheren irregulären Zwerggalaxien außerhalb. Die Simulationen haben gezeigt, dass das »gas stripping« für Zwerggalaxien in Galaxienhaufen eine entscheidende Rolle spielt. Es würde erklären, warum diese Sternsysteme in dichten Galaxienhaufen durch-

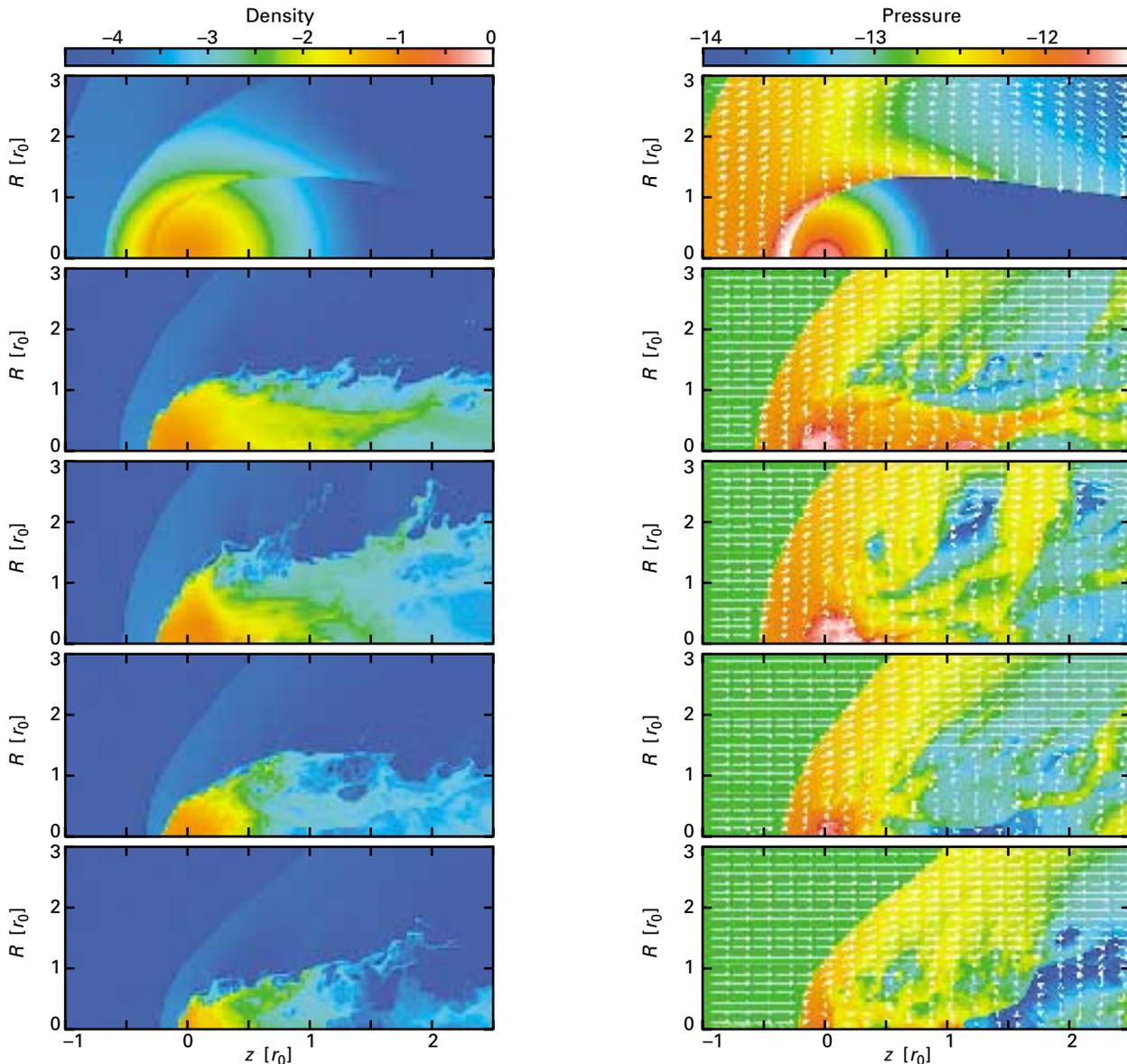


Abb. IV.35: Wie Abb. IV.34, aber mit einer Galaxienmasse von 10^{10} Sonnenmassen. Zeitschritte: 6.8×10^7 , 7×10^8 , 1.2×10^9 , 2.2×10^9 und 3.3×10^9 Jahre.

schnittlich weniger Gas enthalten als in schwach ausgeprägten Haufen, in denen auch die Dichte des intergalaktischen Gases sehr gering ist.

Dieser Vorgang muss sich auch auf die chemische Entwicklung von Zwerggalaxien auswirken. Schwere Elemente gelangen bei der Explosion von Supernovae in das interstellare Medium. Dieses Gas ist anfänglich heiß. Damit es in spätere Sternengenerationen eingebaut werden kann, muss es erst abkühlen und sich in dichten Wolken aus Gas und Staub ansammeln. Nach den gezeigten Simulationen wird dieser Vorgang aber durch das »gas stripping« verhindert. Das heißt, entweder geschah die Anreicherung des interstellaren Mediums mit schweren Ele-

menten sehr rasch in einer frühen Phase der Galaxienentstehung, oder bei den Simulationen wurden physikalische Vorgänge nicht berücksichtigt, die das »gas stripping« verzögern oder sogar teilweise unterbindet. Ein solcher Vorgang könnte das Abkühlen des Gases sein. Strahlungskühlung soll bei zukünftigen Computersimulationen berücksichtigt werden.

Wie Spiralgalaxien zu elliptischen Galaxien verschmelzen

Bis Mitte der 80er Jahre galten elliptische Galaxien als geradezu langweilige Sternsysteme. Dann jedoch stellte man einige interessante Eigenschaften fest: Einige elliptische Galaxien enthalten in ihrem Kernbereich Gas und Sterne, deren kinematische Eigenschaften sich deutlich von denen der übrigen Sterne in der Galaxie

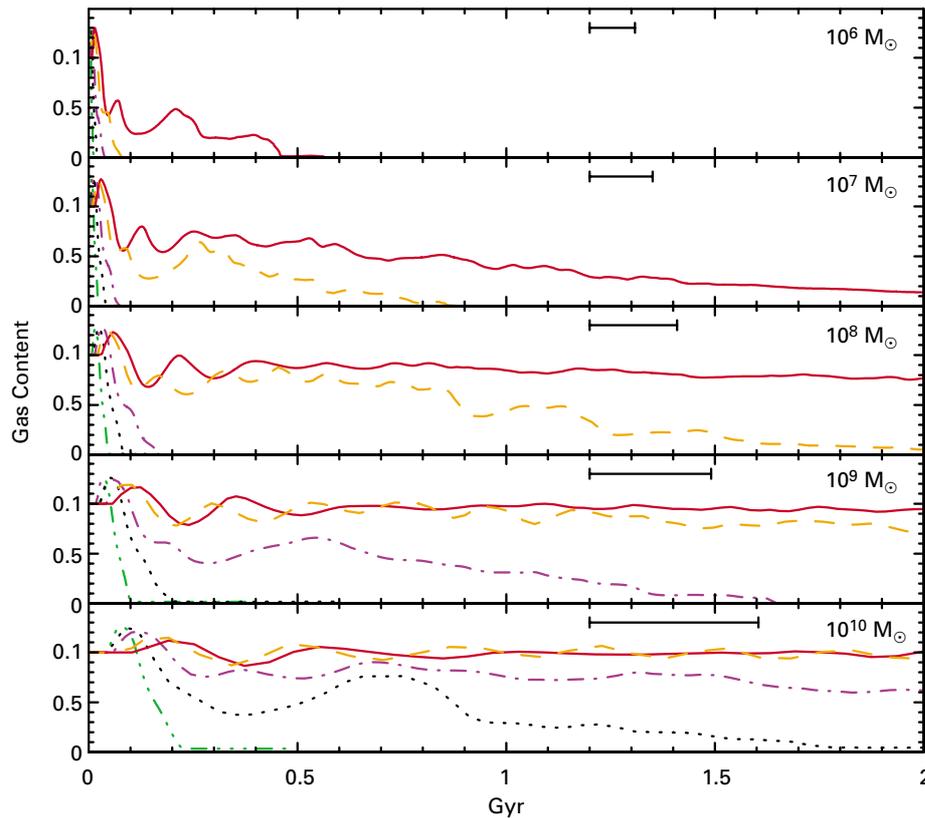


Abb. IV.36: Zeitliche Entwicklung des Gasgehalts von Zwerggalaxien zwischen 10^6 und 10^{10} Sonnenmassen. Die Kurven bedeuten: Strich-Punkt-Punkt-Strich: $n = 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$, $v = 1000 \text{ km/s}$, Punkte: $n = 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$, $v = 500 \text{ km/s}$, Strich-Punkt: $n = 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$, $v = 1000 \text{ km/s}$, Striche: $n = 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$, $v = 500 \text{ km/s}$, Linie: $n = 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$, $v = 1000 \text{ km/s}$.

unterscheiden. In einigen Fällen rotiert der Kern sogar in entgegengesetzter Richtung wie die restliche Galaxie. Im sichtbaren Bereich fand man heraus, dass die auf den ersten Blick elliptische Form im Innern einiger der Galaxien leicht gestört ist. Es zeigten sich kastenförmige (engl. boxy) und scheibenförmige (disky) Iso-photen. Mit Hilfe von Computersimulationen konnte jetzt gezeigt werden, dass sich diese beiden Typen durch das Verschmelzen von Spiralgalaxien erklären lassen. Entscheidend für die Form der entstehenden elliptischen Galaxie ist das Massenverhältnis der beiden Muttergalaxien.

Elliptische Galaxien (Abb. IV.37) lassen sich durch eine triaxiale Form beschreiben, die einem Rugby-Ball ähnelt. Ihr Abplattungsgrad hängt vom Blickwinkel ab, unter dem man das Sternsystem betrachtet. Schaut man in Richtung der Längsachse, so erscheint sie kreisförmig, senkrecht dazu stark elliptisch. Es lassen sich heute hinsichtlich ihrer Leuchtkraft zwei Typen unterscheiden.

Zum einen elliptische Galaxien geringer Leuchtkraft:

- Sie besitzen ein isotropes Geschwindigkeitsfeld,
- sind abgeplattet aufgrund starker Eigenrotation,
- die Geschwindigkeiten der Sterne um die große Symmetrieachse sind klein, und
- im Innern weichen die Iso-photen (Linien gleicher Helligkeit) von der perfekten elliptischen Form ab. Sie sind länglicher (disky) und eher scheibenförmig.

Zum anderen leuchtkräftige elliptische Galaxien:

- Sie sind abgeplattet aufgrund einer anisotropen Geschwindigkeitsverteilung,
- rotieren langsam,
- enthalten kinematisch entkoppelte Kerne,
- die Geschwindigkeiten der Sterne um die große Achse sind hoch, und
- die Iso-photen sind eckig (boxy).

Abb. IV.38 zeigt an einigen beobachteten Parametern, wie sich elliptische Galaxien mit großer und geringer Leuchtkraft voneinander unterscheiden. Der Parameter a_4 beschreibt die Abweichung der Iso-photen von der elliptischen Form. Galaxien mit $a_4 > 0$ haben scheibenförmige Iso-photen (offene Kreise), solche mit $a_4 < 0$ haben kastenförmige Iso-photen (gefüllte Kreise). Im Allgemeinen rotieren scheibenförmige elliptische Galaxien schneller (höheres v/σ), haben ein isotropes Geschwindigkeitsfeld (großes $(v/\sigma)^*$) und rotieren weniger stark um ihre große Achse als kastenförmige elliptische Galaxien.



Abb. IV.37: Die Galaxie M 87 im Virgo-Galaxienhaufen, ein typischer Vertreter einer elliptischen Galaxie.

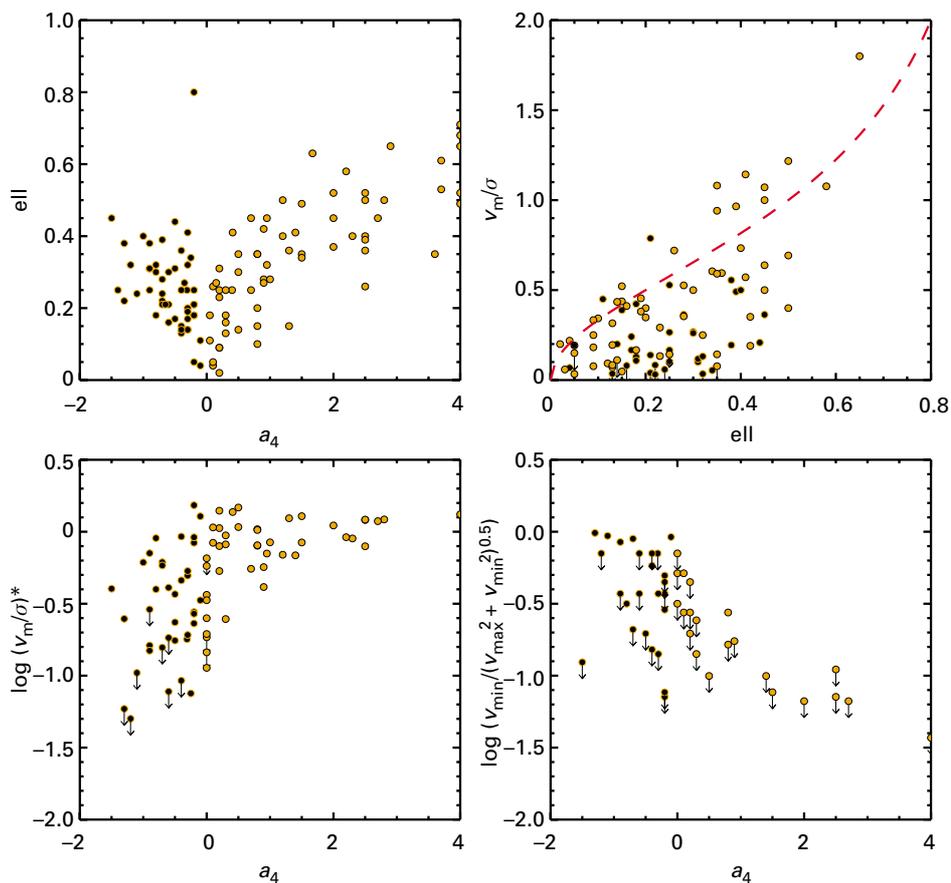


Abb. IV.38: Elliptische Galaxien haben abhängig von ihrer Leuchtkraft verschiedene physikalische Eigenschaften. Links oben: Scheinbare Elliptizitäten der Galaxien in Abhängigkeit vom Parameter a_4 (siehe Text). Scheibenförmige elliptische Galaxien (offene Kreise) haben $a_4 > 0$, kastenförmige elliptische Galaxien (schwarze Punkte) haben $a_4 < 0$. Rechts oben: Das Verhältnis der Rotationsgeschwindigkeit beim Halblichtradius (v_m) zur zentra-

len Geschwindigkeitsdispersion (σ) in Abhängigkeit von der Elliptizität. Die gestrichelte Linie zeigt die Werte für ein theoretisches Modell eines rotierenden, isotropen und oblaten Ellipsoids. Links unten: Grad der Geschwindigkeitsanisotropie (v/σ)* in Abhängigkeit von a_4 . Rechts unten: Stärke der Rotation entlang der kleinen Hauptachse in Abhängigkeit von a_4 .

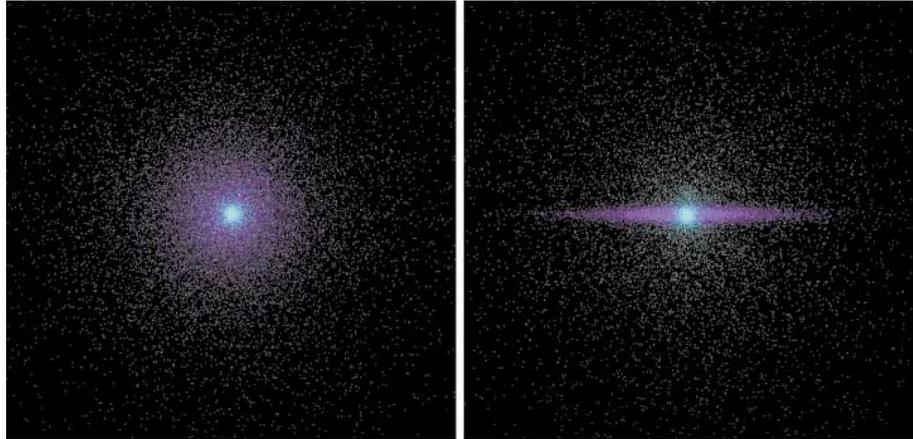
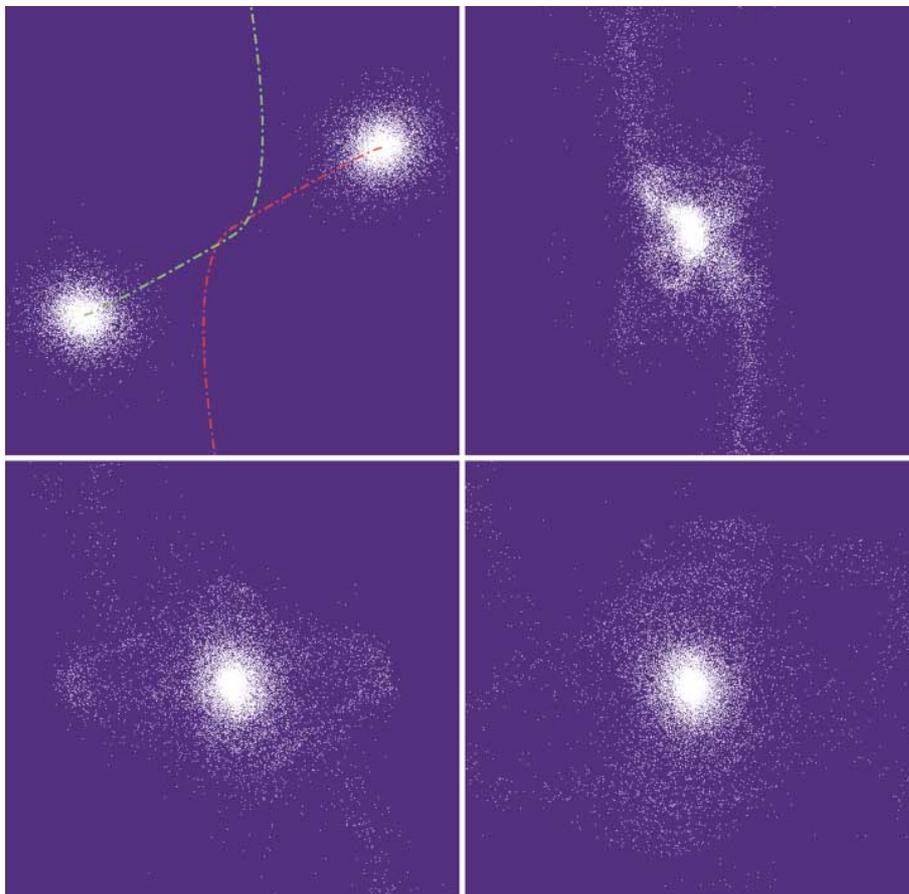


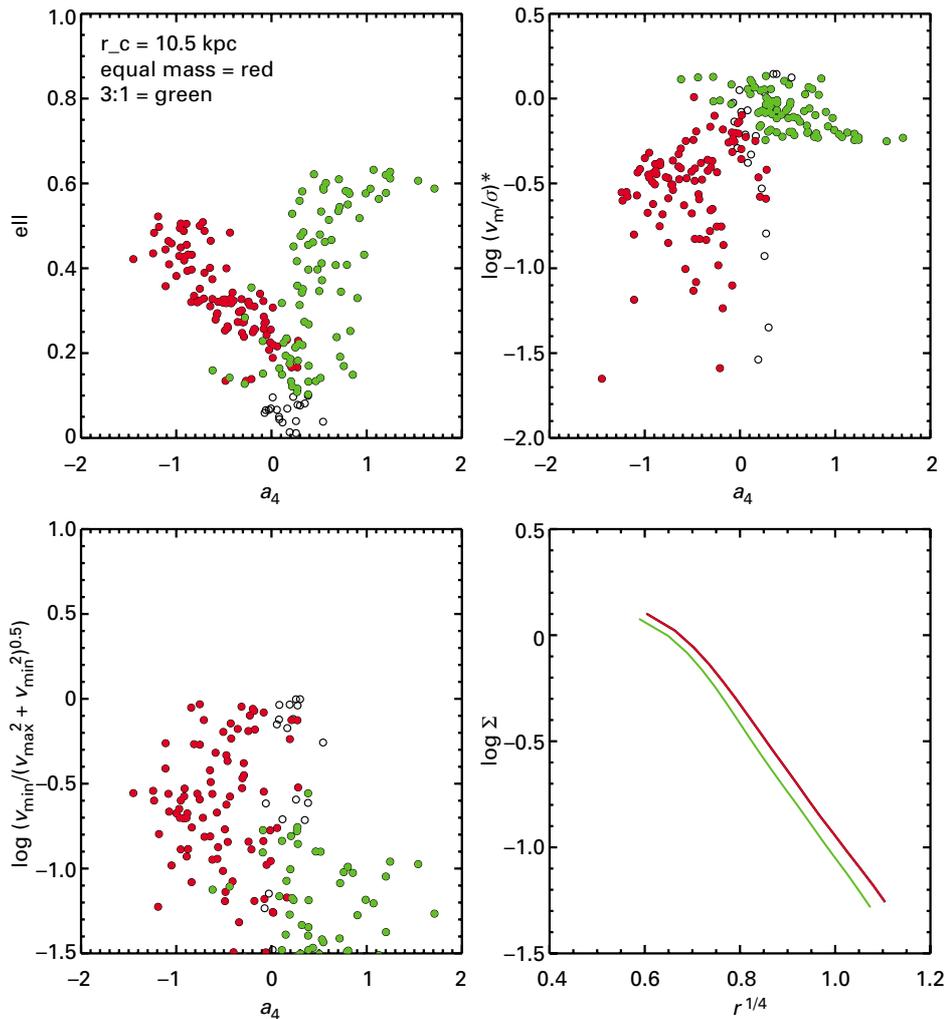
Abb. IV.39: Anfängliche Verteilung der Testteilchen einer Spiralgalaxie vor Beginn einer Simulation.

Es hat bisher verschiedene Ansätze gegeben, diese Unterschiede zu erklären. So nahm man beispielsweise an, dass elliptische Galaxien aus der Verschmelzung zweier Spiralgalaxien entstehen. Diese Hypothese wurde zwar bereits Anfang der 70er Jahre geäußert, detaillierte numerische Simulationen, welche die Spiralgalaxien und deren Halos aus Dunkler Materie mit einbezogen, waren aber

erst ab Ende der 80er Jahre möglich. Sie zeigten, dass ein solches Ereignis tatsächlich zu einem langsam rotierenden, anisotropen sphäroidalen System führen kann. Spätere Arbeiten versuchten dann die scheibenförmigen und kastenförmigen Isophoten dadurch zu erklären, dass man die durch Verschmelzen entstandenen elliptischen Gala-

Abb. IV.40: Vier Schritte beim Verschmelzen zweier gleich großer Spiralgalaxien zu einer elliptischen Galaxie. Die farbigen Linien zeigen die Zweikörperbahn der Galaxien an.





xien lediglich unter verschiedenen Blickwinkeln sieht. Dem widerspricht allerdings die Beobachtungstatsache, dass sich die beiden Typen in den Eigenschaften ihrer Radio- und Röntgenstrahlung unterscheiden.

In einem anderen Ansatz vermuteten Theoretiker, dass unterschiedliche Gasmassen in den ursprünglichen Spiralgalaxien zu unterschiedlichen Isophoten in der entstehenden elliptischen Galaxie führen. Das Verhalten der Gaskomponente während des Verschmelzungsprozesses lässt sich aber nur schwer simulieren, so dass diese Erklärungsmöglichkeit nicht abschließend überprüft werden konnte.

Astronomen des Instituts gingen einem anderen Vorschlag nach, der durch seine Einfachheit besticht. Demnach könnten leuchtkräftige elliptische Galaxie mit kastenförmigen Isophoten aus der Vereinigung zweier gleich großer Spiralgalaxien entstehen, während sich die leuchtkraftarmen elliptischen Galaxien mit scheibenförmigen Isophoten bilden, wenn eine massereiche mit einer massearmen Galaxie verschmilzt.

Um diese Hypothese zu testen, wurden zwei Fälle simuliert: zum einen die Vereinigung von zwei gleich großen Spiralgalaxien und zum anderen von zwei Spiralgalaxien im Massenverhältnis 3:1. Die massereichen Galaxien wurden mit jeweils 200 000 Testteilchen dargestellt, wobei

Abb. IV.41: Ergebnisse der Modellrechnungen im Vergleich mit den Beobachtungen: drei der in Abb. IV.38 besprochenen Größen für die simulierten Galaxien. Rechts unten: Flächenhelligkeit der simulierten Galaxien.

diese aus einem zentralen Bulge (20 000 Teilchen), einer Scheibe mit exponentiell abfallendem Dichteprofil (60 000 Teilchen) und einem sphärischen Halo aus Dunkler Materie (120 000 Teilchen) bestanden (Abb. IV.39). Im Falle des 3:1-Modells beinhaltet die kleinere Galaxie ein Drittel der Teilchenmenge. In den Simulationen wurde lediglich das dynamische Verhalten der Teilchen untersucht. Kompliziertere Vorgänge in der Gaskomponente (Kompression, Aufheizung, Sternentstehung usw.) wurden ignoriert.

Beide Systeme näherten sich einander auf parabolischen Bahnen, wobei die beiden Scheiben um 30 bzw. -30 Grad relativ zur Umlaufebene geneigt waren (Abb. IV.40). Nach dem Verschmelzen wurde eine ausreichende Zeitspanne abgewartet, um das entstandene System im Gleichgewichtszustand betrachten zu können. Anschließend erzeugt man ein »künstliches Bild«, das zeigt, wie diese Galaxie im Teleskop erscheinen würde.

Tatsächlich zeigte das entstandene System das äußere Erscheinungsbild einer elliptischen Galaxie und es fanden sich auch die Abweichungen der Isophoten von perfekten Ellipsen (Abb. IV.41). Hierzu wurde ein Mittelwert aus 200 unter unterschiedlichen Blickwinkeln gewonnenen Beobachtungen gebildet. Tatsächlich zeigt das 3:1-Modell die scheibenförmigen und das 1:1-Modell die kastenförmigen Isophoten. Die numerisch ermittelten Werte passen sehr gut zu den wirklichen. Wie bei den Beobachtungen, zeigen unter den simulierten Galaxien jene mit starken kasten- oder scheibenförmigen Abweichungen auch die großen Elliptizitäten. Simulierte scheibenförmige Galaxien sind isotrop und rotieren nur wenig um ihre große Achse. Die Flächenhelligkeit folgt, wie bei beobachteten Ellipsen, einem $r^{1/4}$ -Gesetz.

Diese Simulationen deuten darauf hin, dass sich die bei elliptischen Galaxien vorkommenden unterschiedlichen Isophotenformen tatsächlich durch das Verschmelzen zweier Spiralgalaxien erklären lassen, ohne die komplizierte Wechselwirkung des interstellaren Gases berücksichtigen zu müssen. Das bedeutet eine wesentliche Vereinfachung gegenüber anderen Modellen. Von nahen kollidierenden Galaxien, wie den Antennengalaxien, ist jedoch bekannt, dass bei einem solchen Vorgang das Gas in anderer Hinsicht sehr wohl eine bedeutende Rolle spielt. Es wird verwirbelt und lokal verdichtet, so dass verstärkt Sternentstehung einsetzt. Inwiefern sich diese Prozesse möglicherweise zusätzlich auf die innere Form und Dynamik von elliptischen Galaxien auswirken, sollen zukünftige Simulationen zeigen.

Staub in Quasaren

Quasare sind kompakte Galaxienkerne mit ungeheuren Leuchtkräften. Da sie auf Himmelsaufnahmen stets punktförmig erscheinen, herrscht über ihre innere Struktur noch große Unklarheit. Auch Entstehung und Entwicklung liegen noch weithin im Dunkeln. Mit ISOPHOT haben Astronomen des MPIA im Infrarotbereich die Frage untersucht, ob alle Quasare nennenswerte Staubmengen enthalten, oder ob es staubfreie, möglicherweise weiterentwickelte Quasare gibt. In der Tat weisen die neuen Daten darauf hin, dass die Quasare von großen Staubmassen umgeben sind. Folgt man klassischen Modellen, so reicht die Aktivität des vermuteten Schwarzen Lochs im Zentrum dieser Himmelskörper in vielen Fällen nicht aus, um die Ferninfrarotemission zu erklären. Es müssen zusätzlich äußerst aktive Sternentstehungsgebiete vorhanden sein, wie man sie auch in kollidierenden ultraleuchtkräftigen Galaxiensystemen findet.

Die Entdeckung der Quasare zu Beginn der 60er Jahre war eine echte Sensation. Bis dahin kannte man keine Himmelskörper mit so hohen spektralen Rotverschiebungen. Strittig war anfänglich, wie die Rotverschiebungen in-

terpretiert werden sollten. Auch über die Natur der Quasare wurde lange diskutiert. Heute ist man einhellig der Meinung, dass es sich um äußerst leuchtkräftige Zentralgebiete von Galaxien handelt, die bis über zehn Milliarden Lichtjahre entfernt sind. In einem Gebiet, das vermutlich nicht wesentlich größer ist als unser Planetensystem, erzeugen diese Himmelskörper bis zu 10^{15} Sonnenleuchtkräfte und sind damit bis zu einige zehntausendmal heller als ganze Galaxien. Sie sind daher bis in große Entfernungen sichtbar.

Als »zentrale Maschine« wird ein massereiches Schwarzes Loch angenommen, das umgebende Materie aufsaugt, wobei diese sich erhitzt und die intensive Strahlung aussendet. Quasare gelten als die leuchtkräftigsten Mitglieder der größeren Gruppe der aktiven galaktischen Kerne. Diese Gruppe umfasst auch sogenannte Starburst-Galaxien, in denen große Sternentstehungsgebiete zur Gesamtmission beitragen.

Der klassische Palomar-Green-Katalog enthält 114 Quasare, die in den 80er Jahren am Palomar-Observatorium im grünen Wellenlängenbereich identifiziert wurden. Nur etwa 20 % dieser sogenannten PG-Quasare konnten mit dem Satelliten IRAS (1983) im Infraroten nachgewiesen werden. ISO versprach eine weitaus höhere Empfindlichkeit als IRAS. Deshalb beobachteten Astronomen des MPIA gemeinsam mit Kollegen von der Heidelberger Landessternwarte sowie vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, und dem Astronomischen Institut der Universität Bochum eine Stichprobe von 17 Quasaren im Wellenlängenbereich von $4.8 \mu\text{m}$ bis $200 \mu\text{m}$ mit ISOPHOT. Hinzu kamen Beobachtungen bei 1.3 mm am deutsch-französischen »Institut für Millimeterwellen-Radioastronomie« (IRAM). Die Stichprobe umfasst einen großen Rotverschiebungsbereich von $z = 0.06$ bis $z = 2.04$, also Entfernungen von 8×10^8 bis zu 7.7×10^9 Lichtjahren (berechnet für eine Hubble-Konstante $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$ und einen Beschleunigungsparameter $q_0 = 0$).

Mit ISO ließen sich 14 der 17 Quasare nachweisen. Angesichts der zufälligen Auswahl der Quellen ist diese Nachweisrate von etwa 80 % enorm hoch. Unter der Nachweisgrenze blieben lediglich drei Quellen, die in Himmelsregionen mit besonders hellem galaktischem Vordergrund liegen. In zirkusfreien Regionen wäre ein Nachweis von Staubemission mit ISO vermutlich problemlos gelungen. Bei 1.3 mm Wellenlänge wurden mit IRAM zehn Quasare vermessen. Damit liegen für eine konsistente Stichprobe optisch ausgewählter Quasare erstmals umfangreiche Infrarotdaten vor, die eine Reihe weitreichender Schlussfolgerungen ermöglichen.

Schwarze Löcher und Sternentstehungsgebiete

Dass es sich bei der beobachteten Infrarotstrahlung tatsächlich um die thermische Emission von Staub, und nicht um bislang ebenfalls diskutierte Synchrotronemission von Elektronen in Magnetfeldern, handelt, lässt sich klar an der Form der spektralen Energieverteilung erkennen: Die

gemessene Intensität steigt vom optischen bis zum Ferninfrarot hin an und erreicht ein Maximum im Bereich von 50 bis 100 μm (Abb. IV.42). Jenseits von 100 μm fällt das Spektrum bis 1.3 mm steil auf sehr niedrige Werte ab. Dies unterstreicht die Bedeutung der neuen Daten, die besonders im extremen Ferninfrarot eine bislang bestehende Datenlücke geschlossen haben. Die Strahlung stammt von thermisch emittierendem Staub, dessen Temperatur im Bereich zwischen 20 und 120 K liegt. Bei kürzeren Wellenlängen lassen sich auch wärmere Anteile mit Temperaturen bis zu 1000 K nachweisen. Diese große Spanne in den Staubtemperaturen liefert wertvolle Hinweise auf die mögliche Verteilung der interstellaren Materie im Quasar.

Quasare erscheinen auf optischen Aufnahmen vom Boden aus punktförmig, lassen also keine räumlichen Details erkennen. Mit dem Weltraumteleskop Hubble wurden von amerikanischen Forschern einige der besonders nahen PG-Quasare beobachtet, darunter auch der in der ISO-Stichprobe enthaltene Quasar PG 0052+251 mit einer Rotverschiebung von $z = 0.155$. Auf dieser hoch aufgelösten Aufnahme erkennt man, dass der Quasar in einer Spiralgalaxie mit einem Ring aus hellen Knoten liegt, bei denen es sich vermutlich um heiße, junge Sternentstehungsgebiete handelt (Abb. IV.43).

Dies deutet bereits darauf hin, dass zumindest in einigen der beobachteten Quasare Sternentstehung eine we-

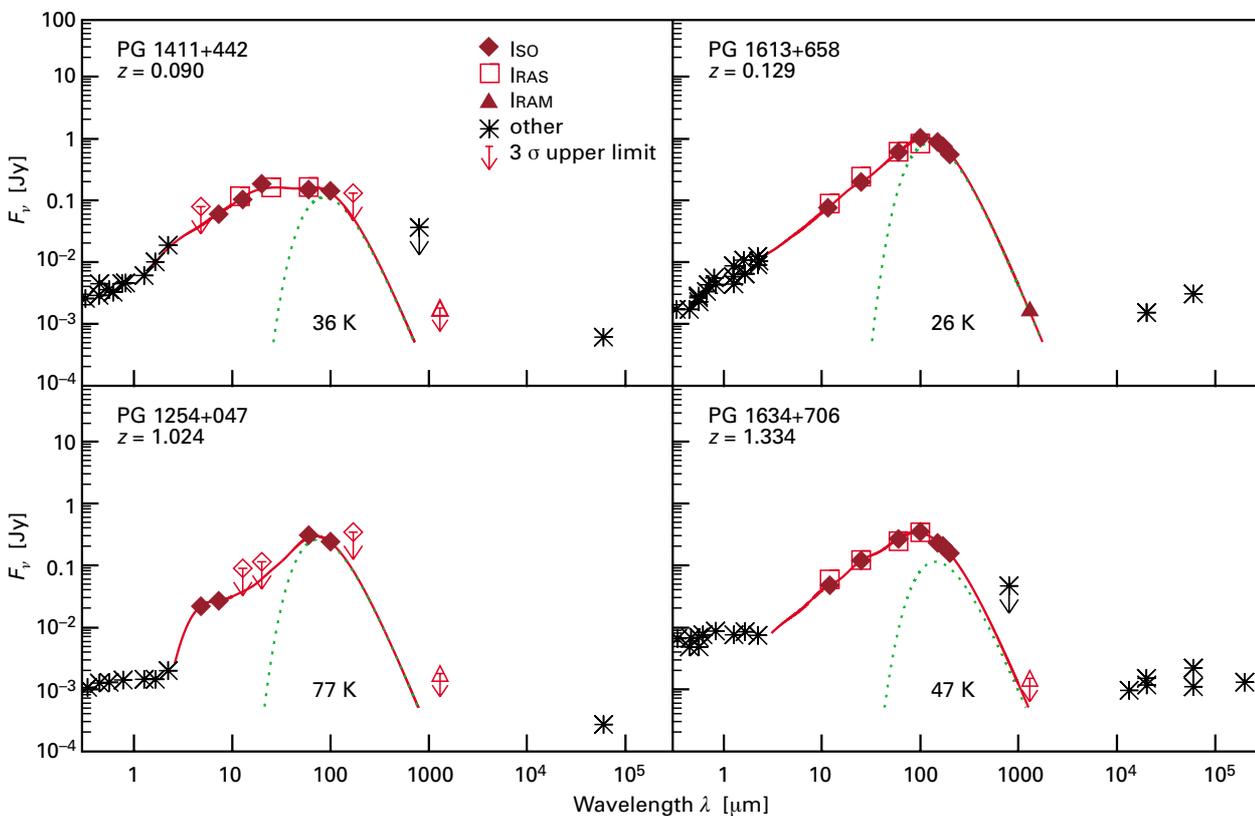
sentliche Rolle spielt. Diese Hypothese wird auch durch die neuen Infrarotbeobachtungen gestützt: Klassische Modelle legen nämlich nahe, dass die im Zentralbereich erzeugte Strahlung zwar den nahe gelegenen Staub auf hohe Temperaturen aufzuheizen vermag, jedoch nicht genügend Energie in die entfernteren kühleren Bereiche transportiert. Eine dicke, das zentrale Schwarze Loch umgebende Staubscheibe beispielsweise würde zwar die Emission im nahen und mittleren Infrarot erklären, jedoch nicht den Exzess im fernen Infrarot. Will man diesen ausschließlich mit der Heizung durch eine zentrale Quelle deuten, muss man entweder sehr spezielle und zum Teil physikalisch wenig plausible Staubverteilungen annehmen, oder auf ganz andere, noch unausgereifte Modelle zurückgreifen.

Wenn beispielsweise der aktive galaktische Kern von einer stark inhomogenen, »klumpigen« Staubscheibe umgeben ist, könnte energiereiche Röntgen- und UV-Strahlung den Weg vom Zentrum durch die Lücken hindurch in die kühleren Außenbereiche finden und dort große Staubmassen im Ferninfraroten zum Leuchten bringen. Als alternative Erklärung des Ferninfrarotexzesses ist aber vor allem die Starburst-Hypothese (s.u.) von bestechender Eleganz.

Bei genauerer Analyse zeigen sich interessante Unterschiede in der Form der Energieverteilungen. Grob lassen sich drei Gruppen bilden (Abb. IV.42):

- Gruppe 1: Intensitätsanstieg vom nahen IR bis zum fernen IR nach einem Potenzgesetz. Diese Verteilung könnte durch Staub erzeugt werden, der von einer zentralen Quelle erwärmt wird und dessen Temperatur mit

Abb. IV.42: Spektrale Energieverteilungen der Quasare im Infrarot.



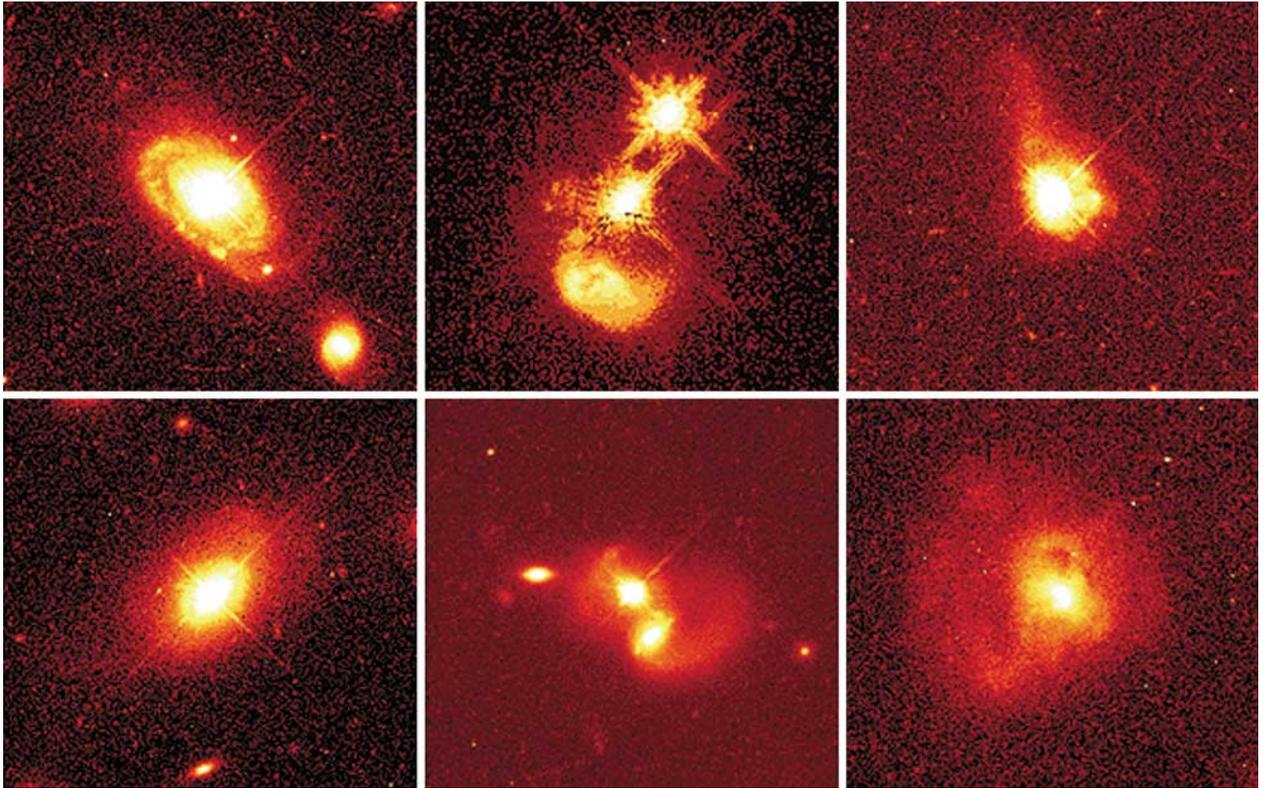


Abb. IV.43: Mit dem Weltraumteleskop Hubble wurden einige nahe Quasare und die sie umgebenden Galaxien beobachtet, darunter auch der in der ISO-Studie enthaltene PG0052+251 (oben links).

wachsendem Abstand sinkt. Am ehesten kommt hierfür wohl eine durchbrochene, klumpige Scheibe in Frage, aber eventuell auch zusätzliche Starbursts in den Außenbereichen.

- Gruppe 2: Ebenfalls Anstieg zum fernen IR, mit erhöhter Emission im mittleren IR. Eine solche Energieverteilung könnte allein durch warmen Staub in der Umgebung des zentralen Schwarzen Lochs erzeugt werden.
- Gruppe 3: Intensitätsanstieg mit zwei Maxima, einem kleinen im mittleren sowie einem dominanten im fernen IR. Hierzu zählt auch der in Abb. IV.43 gezeigte Quasar. Die Dominanz des Ferninfrarotmaximums lässt sich am besten damit erklären, dass hier zusätzlich zum aktiven galaktischen Kern auch zahlreiche Sternentstehungsgebiete Staub erwärmen. Diese Vermutungen ließen sich durch multispektrale Untersuchungen weiter überprüfen.

Aufschlussreiche Korrelationen

Für die ausgewählten Quasare lagen auch bereits Beobachtungsdaten aus anderen Spektralbereichen, wie im blauen Licht und im Röntgenbereich, vor. Darüber hin-

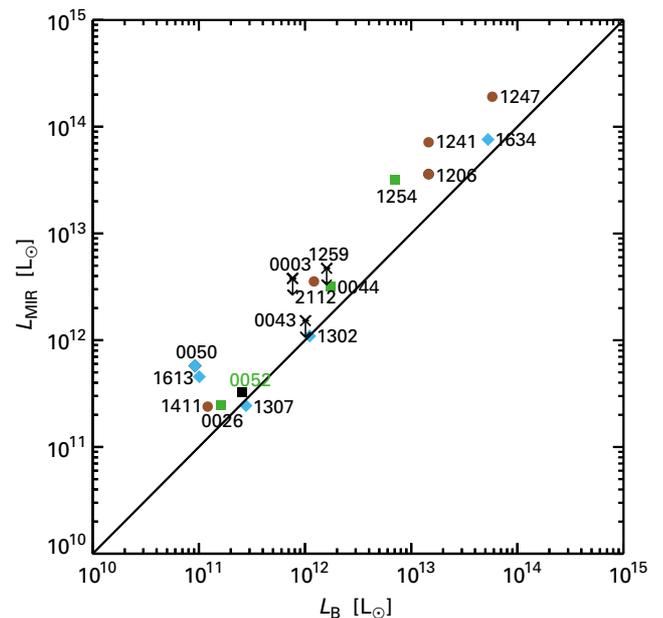


Abb. IV.44: Die Leuchtkraft im fernen Infrarot steigt mit derjenigen im mittleren Infrarot an.

aus sind alle Rotverschiebungen (Entfernungen) bekannt, so dass man nach Zusammenhängen zwischen diesen Größen suchen kann. Hierbei zeigten sich einige eindeutige Korrelationen: So steigen die Infrarotleuchtkräfte im mittleren IR mit denen im fernen IR an. Ebenso steigen die Leuchtkräfte im mittleren und im fernen IR jeweils mit denen im blauen Licht an (Abb. IV.44, 45 und 46).

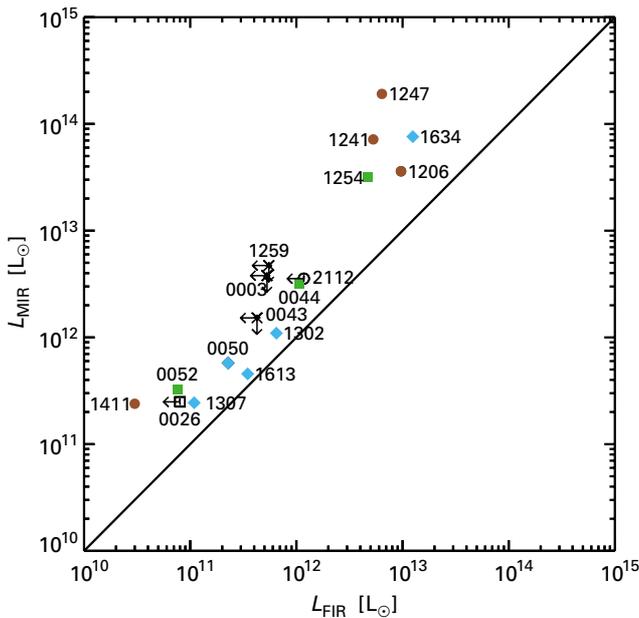


Abb. IV.45: Die Leuchtkraft im mittleren Infrarot steigt mit derjenigen im Blauen an.

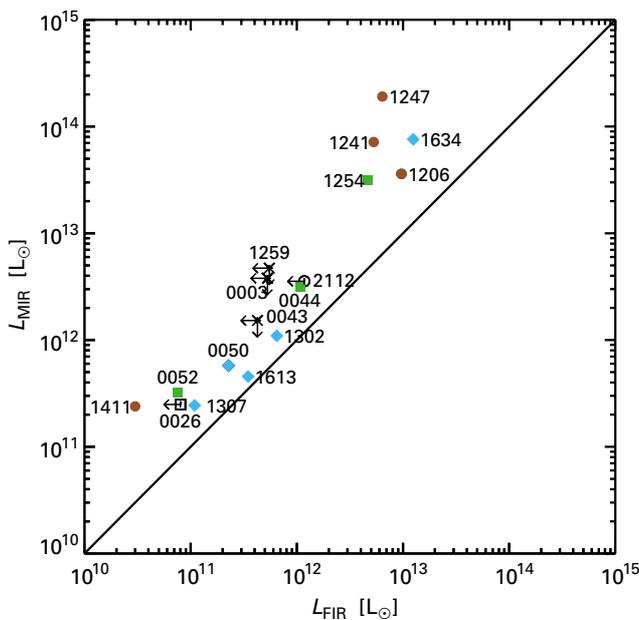


Abb. IV.46: Die Leuchtkraft im fernen Infrarot steigt mit derjenigen im Blauen an.

Die Korrelationen deuten auf eine gemeinsame Quelle oder – weitaus interessanter – auf eine ursächliche Verbindung zwischen den zwei denkbaren Quellen – aktiver galaktischer Kern und Sternentstehungsprozess – hin. Beispielsweise wird bei der Kollision zweier Galaxien intensive Sternentstehung ausgelöst, ein Vorgang, der bereits bei nahen Galaxien beobachtet wurde und zu erhöhter Ferninfrarotstrahlung führt. Während Sterne bei einem solchen Vorgang aneinander vorbeifliegen, stößt die interstellare Materie zusammen. Dabei verringert sie ihre Bahngeschwindigkeit und damit auch ihr stabilisierendes

Drehmoment. Als Folge wird sie in größeren Mengen in das Zentralgebiet der Galaxie trudeln und dort besonders effektiv das Schwarze Loch füttern. Dadurch steigt die Leuchtkraft im blauen Licht (vor allem durch die Wasserstoffemission Lyman alpha), und gleichzeitig erwärmt der aktive galaktische Kern verstärkt den umgebenden Staub, der dann im mittleren Infrarot leuchtet.

Quasare und ultraleuchtkräftige Infrarotgalaxien (ULIRGs)

Die Infrarotstrahlung der Quasare ist mit 10^{11} bis 10^{14} Sonnenleuchtkräften sehr hoch. Die höchsten Werte übersteigen bei weitem den Bereich von 10^{12} bis 10^{13} Sonnenleuchtkräften der ultraleuchtkräftigen Infrarotgalaxien. Deren IR-Leuchtkraft wird interessanterweise hauptsächlich auf intensive Sternentstehung zurückgeführt. Lediglich einige sogenannte »warme« ULIRGs mit relativ hoher Intensität im mittleren Infrarot enthalten einen starken aktiven Kern. Bereits kurz nach ihrer Entdeckung durch IRAS wurde die noch heute heftig diskutierte Hypothese aufgestellt, dass die warmen ULIRGs Vorläufer von Quasaren in einem sehr frühen Entwicklungsstadium sind. Die neuen ISO-Daten legen jedoch einen einfacheren Schluss nahe: Warme ULIRGs und Quasare sind ein und dasselbe. Der Unterschied besteht einzig darin, dass die Quasare auf optischen Aufnahmen und die ULIRGs im fernen Infrarot identifiziert wurden.

Die aus den Leuchtkräften und Temperaturen abgeleiteten Werte für die Staubmassen der Quasare liegen im Bereich von 10^6 bis 10^9 Sonnenmassen. Solche Werte sind typisch für staubreiche Spiralgalaxien und auch für ULIRGs. Wie passt nun viel Staub mit der blauen kaum extinguierten Erscheinung der Quasare im Optischen zusammen? Wenn der Staub auf der Sichtlinie zum Quasar liegt, sollte das optische Licht stark gerötet sein. Als geeignete Geometrie bietet sich an, dass der Staub in einer Scheibe konzentriert ist und dass wir das System von oben, also aus der Polrichtung, oder unter geringer Neigung sehen.

Welche Eigenschaften würde uns ein solcher Quasar zeigen, wenn das System uns die Kante zuwendet? Eine einfache Abschätzung zeigt, dass eine das Zentralgebiet umgebende Staubscheibe mit 10^8 Sonnenmassen ausreicht, um den Kern vollständig abzuschatten: Im Optischen würde ein solches blass schimmerndes, stark gerötetes Objekt dann kaum als leuchtkräftiger Quasar erkannt. Im Ferninfrarot leuchtet er jedoch vermutlich isotrop und genauso hell wie die aus Polrichtung gesehenen Geschwister. Wie hell er im mittleren Infrarot erscheint, hängt von der Abschattung der Kernregion durch die äußeren Staubschichten ab. Denkbar ist allerdings, dass die mittlere Infrarotstrahlung ebenfalls abgeschwächt ist. Ein von der Kante gesehener Quasar erscheint uns dann so wie eine kühle ULIRG. Es gibt momentan allerdings kaum Möglichkeiten, in einer kühlen ULIRG zweifelsfrei einen aktiven Kern nachzuweisen oder zu widerlegen — eine harte Nuss für die Forschung!

IV.3 Das Sonnensystem

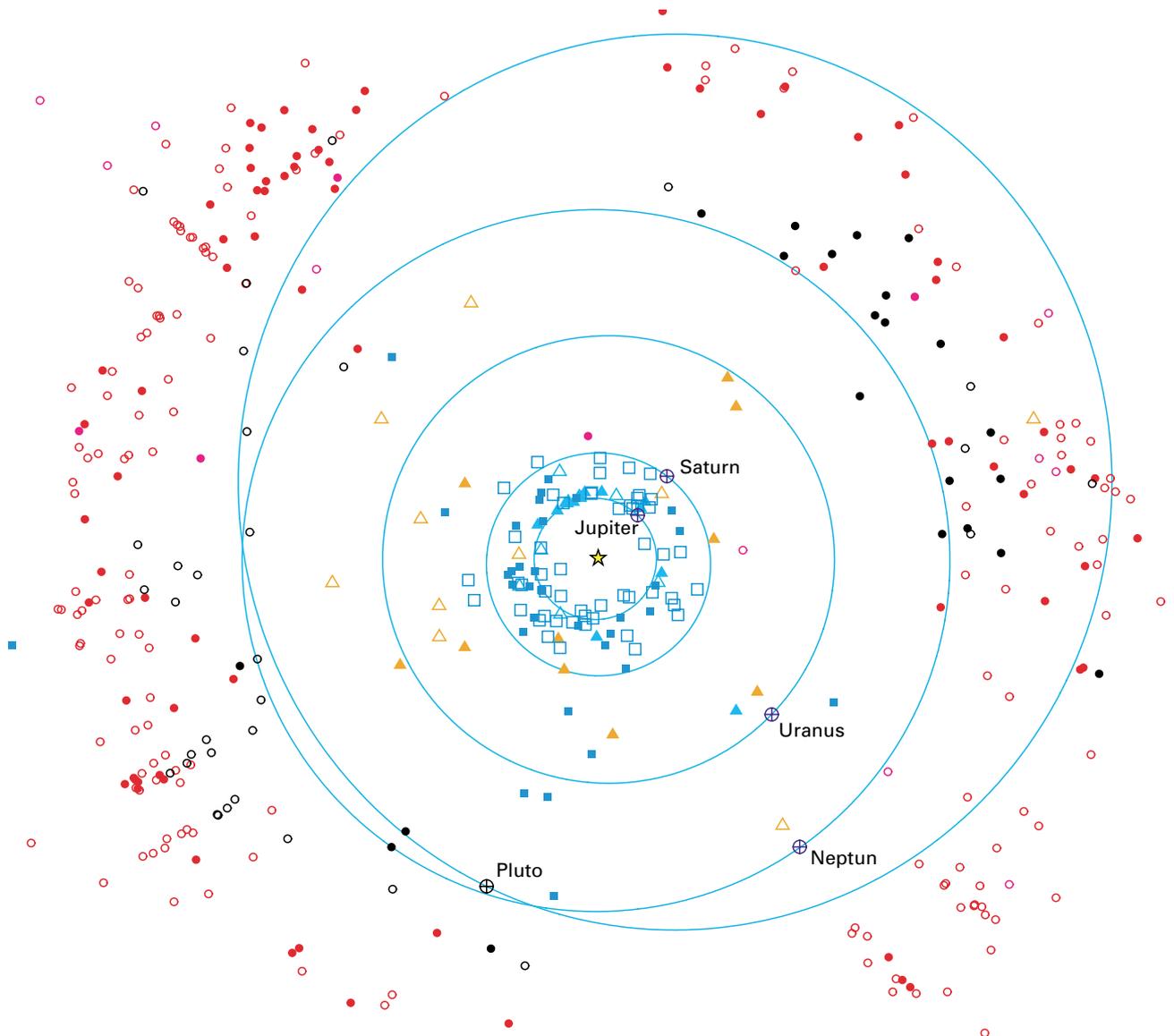
Störte ein naher Stern die Entstehung der Planeten?

1992 entdeckten amerikanische Astronomen ein sehr lichtschwaches Objekt mit etwa 200 Kilometern Durchmesser, das die Sonne in einer Entfernung von 40 Astronomischen Einheiten (AE) umkreist. Es war das erste bekannte Mitglied des so genannten Kuiper-Gürtels jenseits der Bahnen von Pluto und Neptun. Bis heute sind über hundert weitere Kuiper-Objekte entdeckt worden, vermutlich halten sich insgesamt einige zehntausend Körper mit Durchmessern von mehr als hundert Kilometern in diesem Bereich des Planetensystems auf. Die Bahnen der Kuiper-Objekte jenseits von 42 AE weisen ungewöhnlich hohe Exzentrizitäten auf und sind stark gegen die Ekliptik geneigt. Die Theoriegruppe des Instituts fand mit Hilfe nu-

merischer Simulationen eine mögliche Erklärung hierfür: Ein nur etwa 160 AE entfernter Stern störte die Himmelskörper in der äußeren protoplanetaren Scheibe. Dadurch gerieten sie auf stark exzentrische und geneigte Bahnen, die sie bis heute beibehielten.

Schon 1951 hatte der Astronom Gerard Kuiper vorhergesagt, dass es jenseits der Plutobahn einen Schwarm kleiner Körper geben müsse. Ausgangspunkt seiner Überlegungen waren die Bahnen der Kometen. Langperiodische Ko-

Abb. IV.47: Die Verteilung einiger kleiner Körper im Sonnensystem. (Graphik: Minor Planet Center)



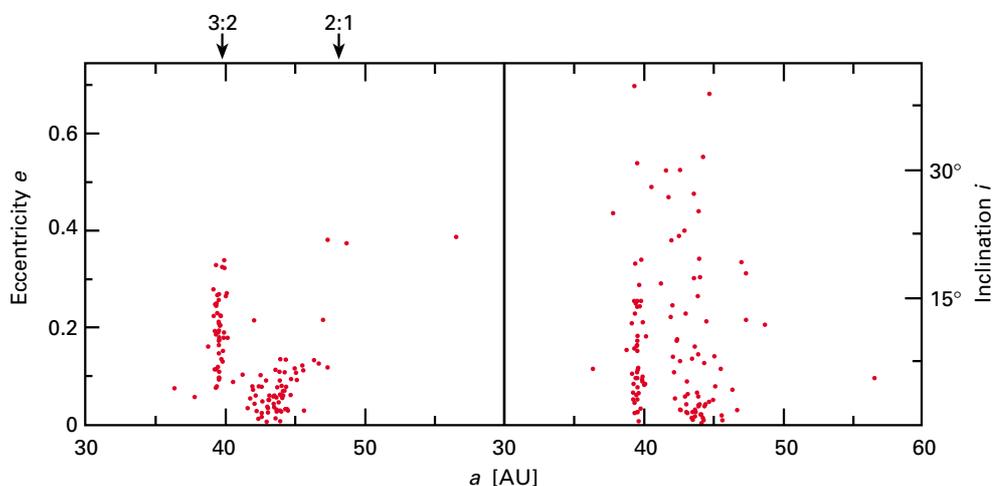
meten mit Perioden von 130 Jahren und mehr stammen sehr wahrscheinlich aus der Oortschen Wolke. Dies ist ein kugelschalenförmiger Bereich, der die Sonne in einem Abstandsbereich zwischen 20 000 und 70 000 AE umgibt (Abb. IV.47). In ihm bewegen sich vermutlich einige hundert Milliarden Körper, die durch gravitative Störungen ins innere Sonnensystem gelangen können und dort als Kometen aufleuchten.

Bahnanalysen deuteten jedoch darauf hin, dass kurzperiodische Kometen einen anderen Herkunftsort haben. Sie stammen vermutlich aus einem gürtelförmigen Bereich, der die Sonne in einem Abstand von etwa 30 bis 500 AE umgibt. Nähert sich ein Kuiper-Objekt dem großen Planeten Neptun, so kann dieser den Körper ins innere Sonnensystem schleudern, wo er in Sonnennähe als Komet erscheint.

Drei Gruppen von Kuiper-Objekten

Mittlerweile sind so viele Kuiper-Objekte bekannt, dass sich auf Grund ihrer Kinematik drei Gruppen unterscheiden lassen. Gruppe 1 findet sich bei 39.5 AE Entfernung (Abb. IV.48). Diese Population lässt sich sehr gut dadurch erklären, dass hier die Umlaufperioden der Kuiper-Objekte mit der Periode von Neptun in einem ganzzahligen Verhältnis von 3:2 stehen. Dies hat in der Vergangenheit dazu geführt, dass Körper in der Nähe dieser Resonanzbahn auf Grund der gravitativen Wechselwirkung mit Neptun in die Resonanzbahn hineingezogen wurden. Gruppe 2 bilden die Körper der so genannten gestreuten Scheibe (englisch: scattered disk) (violette Kreise in Abb. IV.47). Sie sind in der Vergangenheit einmal Neptun so nahe gekommen, dass sie durch dessen Gravitation auf extrem elliptische Bahnen mit einem Perizentrum nahe der Neptunbahn geschleudert wurden.

Abb. IV.48: Exzentrizitäten und Bahnneigungen der bis heute bekannten Kuiper-Objekte.



Gruppe 3 bilden alle Kuiper-Objekte, die von der Sonne weiter als 42 AE entfernt sind. Deren Bahnen sind stark elliptisch und zum Teil stark gegen die Ekliptik geneigt. Diese Eigenschaften lassen sich nicht durch eine Wechselwirkung mit Neptun erklären. Stattdessen wurden andere Mechanismen vorgeschlagen, die prinzipiell für die Bahnformen verantwortlich sein könnten. So wurde beispielsweise spekuliert, dass in den Außenbereichen des Sonnensystems anfänglich auch Planeten etwa von der Größe der Erde existiert haben könnten, welche die umgebende Population der Kuiper-Objekte gravitativ gestreut haben. Später sind diese Planeten dann aus dem Sonnensystem herausgeschleudert worden. Allerdings lässt sich diese Hypothese nicht weiter belegen.

Wirbelte ein naher Stern die Kuiper-Population durcheinander?

Theoretiker des MPIA gingen zusammen mit Kollegen der Universität Tokio und des Queen Mary and Westfield College, London, einer anderen Hypothese nach. Frühere Arbeiten am Institut haben belegt, dass die meisten Sterne in Doppel- oder Mehrfachsystemen entstehen. Etwa die Hälfte dieser Systeme lösen sich jedoch auf, bis die Sterne das Hauptreihenstadium erreicht haben (s. Jahresbericht 1997, S. 49, und 1998, S. 47). Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, dass sich zwei Doppelsternsysteme nahe aneinander vorbei bewegen. Es erscheint daher nicht ausgeschlossen, dass auch die Protosonne anfänglich einen Begleitstern besaß oder dass ein anderer Stern nahe an der Sonne vorbeiflog. Wenn dies zu einer Zeit geschah, in der sich die Kuiper-Objekte bereits gebildet hatten, könnte der Stern einen Teil von ihnen auf stark exzentrische und geneigte Bahnen geworfen haben, auf denen sie sich bis heute bewegen.

Um diese Hypothese zu testen, wurde angenommen, dass ein Stern mit einer Sonnenmasse auf einer parabolischen Bahn an der Sonne vorbeifliegt. Dann wurde die Reaktion der aus 10 000 Teilchen angenommenen Kuiper-

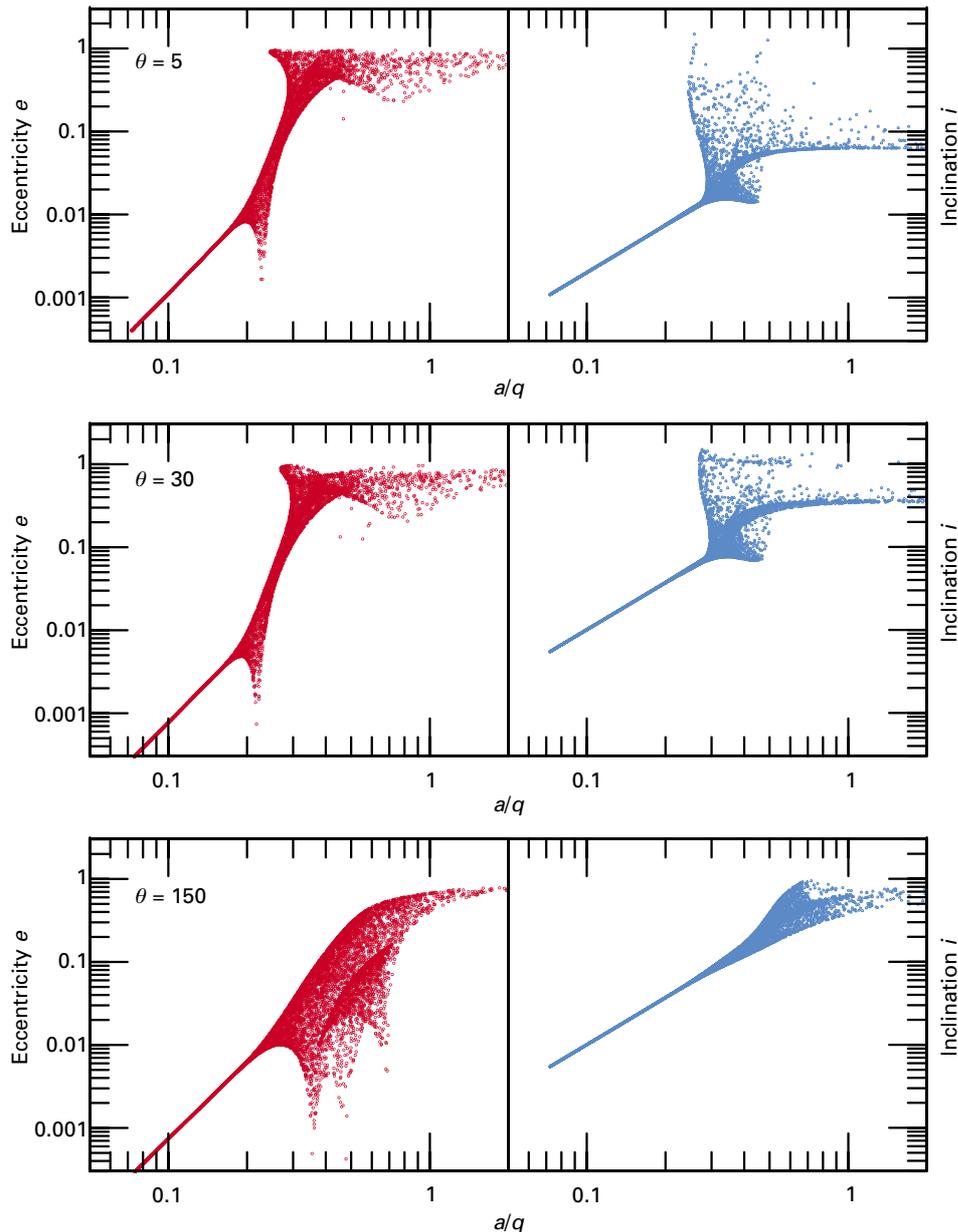


Abb. IV.49: Entstehende Exzentrizitäten und Bahnneigungen der Objekte im Kuiper-Gürtel nach dem Vorbeigang eines Sterns. θ ist der Neigungswinkel der Bahnebene des Sterns gegen die Ekliptik, a/q ist der Abstand von der Sonne in Einheiten des Perizentrums q .

Population beobachtet. Hierbei wurden die beiden entscheidenden Parameter variiert: die geringste Entfernung des Sterns von der Sonne (Perizentrum q) und die Neigung der Bahnebene des Sterns gegen die Ekliptik. Generell ist die Wechselwirkung um so stärker, je massereicher der Stern ist und um so geringer Neigungswinkel und minimaler Abstand sind. Zu Beginn der Simulationen liefen die Kuiper-Teilchen auf nahezu kreisförmigen Bahnen in der Ekliptik um die Sonne. Nach dem nahen Vorbeiflug des Sterns stie-

gen tatsächlich die Exzentrizitäten und Bahnneigungen in den Außenbereichen wie erhofft stark an (Abb. IV.49). Abb. IV.50 zeigt, wie sich die Bahnen der Kuiper-Objekte verändern. Als Parameter wurde hier der auf das Perizentrum q normiert Abstand a/q gewählt. Liegt das Perizentrum des Vorbeiflugs bei $q = 100$ AE, so steigen die Exzentrizitäten der Kuiper-Bahnen jenseits von 25 bis 35 AE auf über 0.1 an. Viele Körper werden bei einem solchen Vorgang sogar aus dem Sonnensystem herausgeschleudert. Genau sind es 75% bzw. 95% in Entfernungen von $a/q = 0.5$ bzw. 0.7 (entsprechend 50 AE und 70 AE bei einem Vorbeigang in einer Minimalentfernung von 100 AE).

Die beste Übereinstimmung der theoretischen mit den beobachteten Werten ergab sich für einen Neigungswinkel von 30 Grad und ein Perizentrum von 160 AE. Wählt man aus diesem Rechenlauf willkürlich 500 Teilchen im

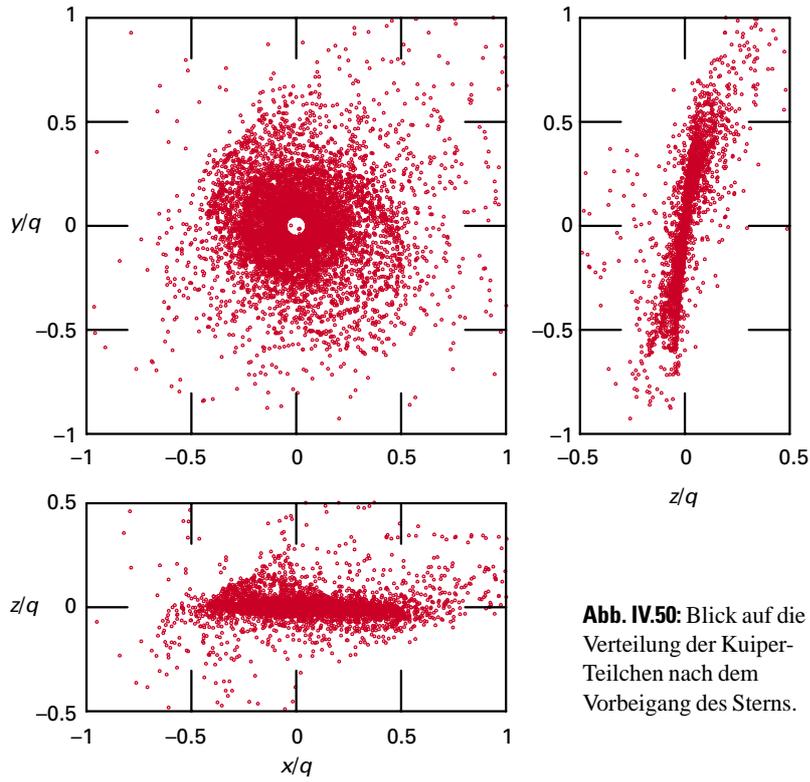


Abb. IV.50: Blick auf die Verteilung der Kuiper-Teilchen nach dem Vorbeigang des Sterns.

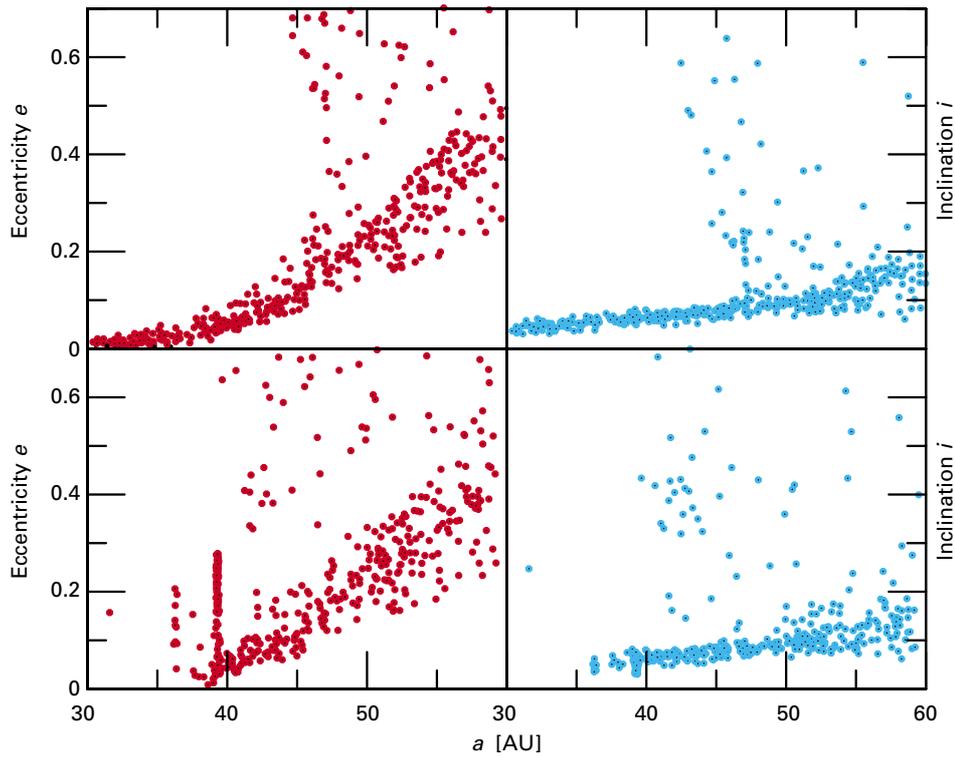


Abb. IV.51: Exzentrizitäten und Bahnneigungen der Kuiper-Objekte nach dem Vorbeigang eines Sterns in 160 AE Entfernung bei einem Neigungswinkel θ von 30 Grad. Oben: ohne die Schwerkraftwirkung Neptuns, unten mit ihr.

Bereich zwischen 30 und 65 AE aus (Abb. IV.51), so ergibt sich ein direkter Vergleich mit den in Abb. IV.48 gezeigten Beobachtungsdaten. Man erkennt die stark ansteigenden Exzentrizitäten jenseits von etwa 42 AE, wie sie auch beobachtet werden. Wurde zusätzlich der Planet Neptun in die Simulation eingefügt, so stellte sich auch die Überhäufigkeit der Körper in der 3:2-Resonanz bei 39.5 AE ein (Abb. IV.51, unten). Körper innerhalb von 30 AE, die nicht in diese Resonanz geraten, können bei einem nahen Vorbeigang an Neptun auf Bahnen mit hohen Neigungswinkeln geschleudert werden. Sie bilden die Gruppe 2 der »gestreuten Scheibe«.

Eine abschließende Abschätzung zeigt, dass die Kuiper-Objekte bis heute auf diesen Bahnen geblieben sind. Eine nahe Sternpassage kann also ihren »Fingerabdruck« in Form der Kuiper-Bahnen hinterlassen haben. Das simulierte Szenario lässt sich übrigens durch weitere Beobachtungen überprüfen. Es sagt nämlich voraus, dass die mittleren Exzentrizitäten mit steigender Entfernung von der Sonne stark anwachsen müssten – ganz im Gegensatz zu der Hypothese, dass Planeten von der Größe der Erde die Kuiper-Objekte gestört haben. Wäre dies der Fall, so müssten die Exzentrizitäten mit wachsender Entfernung von der Sonne wieder abnehmen.

Personal

In Heidelberg

Direktoren: Appenzeller (Kommissarische Leitung), Beckwith (beurlaubt), Rix (Direktor, ab 1.1.).

Wissenschaftliche Mitarbeiter: Abraham, Bailer-Jones, Beetz, Bianchi (ab 1.11.), Birkle, Burkert, Dehnen (ab 1.7.), Feldt (ab 1.2.), Fried, Graser, Haas, Herbst, Hippelein, Huang (bis 31.1.), Ibata (ab 1.10.), Klaas, Kley (ab 1.10.), Kümmel (ab 1.2.), Leinert, Lemke, Lenzen, Ligorì, MacLow (bis 30.6.), Marien, Meisenheimer, Mundt, Neckel, Patsis (1.1.-30.9.), Radovich (bis 14.9.), Röser, Schmid (1.4.-30.9.), Schmidtobreck (bis 31.7.), Slyz, Staude, Stickel, Wilke (ab 1.1.), R. Wolf, Zickgraf (1.2.-31.3.).

Doktoranden: Baumann, Eckardt (bis 28.2.), Geyer (ab 1.1.), Hartung (ab 1.6.), Heitsch, Hetznecker, Hotzel, Jester, Kasper, Kranz, Lang (ab 1.10.), Maier (ab 1.10.), Naab, Phleps, Rudnik (24.5.-6.8.), Schuller, Seidel (bis 30.4.), v. Kuhlmann, Weiss (ab 1.6.), Woitas (bis 31.8.).

Diplomanden: Helfert (ab 1.2.) Jesseit (ab 1.2.), Khochfar (ab 1.4.), Krause, Wackermann (bis 30.9.), Wetzstein (ab 1.12.). Von der FH Mannheim: Leborg (15.3.-14.9.), Lehmitz (bis 31.3.), Müller (ab 1.9.), Müller-Zumstein (1.3.-31.8.), Steckel (bis 28.2.), Thomas (bis 28.2.).

Wissenschaftliche Dienste: Bizenberger, Fabian (ab 1.10.), Hiller, Khan (bis 30.4.), Ortlieb (bis 31.7.), Laun (ab 1.8.), Mathar (ab 1.2.), Quetz, Tusche (bis 31.7.).

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

Elektronik: Becker, Ehret, Grimm, Grözingler, Klein, Lehmitz (1.9.-31.12.), Ridinger, Salm, Unser, Wagner, Werner, Westermann, Wrhel.

Feinwerktechnik: Böhm, Geuer (ab 1.3.), Heitz, Meister, Meixner, Morr, J. Pihale, Sauer.

Konstruktion: Baumeister (ab 1.8.), Benesch, Franke, Münch, Rohloff.

Photolabor: Anders-Özcan.

Graphikabteilung: Meißner-Dorn, Weckauf.

Verwaltung, Sekretariat: Behme, de Mooij (bis 30.11.), Fink (bis 31.10.), Flock, Gieser, Goldberger (ab 1.4.), Hartmann, Heißler, Heukäufer, Janssen-Bennynck, Kel-

lermann, Papousado, Rushworth, Schleich, Ullrich (1.7.-31.12.), Zähringer.

Technischer Dienst, Hausdienst: Behnke (ab 1.12.), Gatz, O. Götz, Herz (ab 1.8.), Klingmann (bis 31.8.), Lang, Nauss, Witzel, B., Witzel, F., Zergiebel.

Auszubildende: (Feinmechanik) Fabianatz, Greiner, Geuer (bis 28.2.), Haffner, Jung, Lares (ab 1.9.), Petri (ab 1.9.), Wesp.

Freier Mitarbeiter: Dr. Bürke.

Stipendiaten: Barrado-Navascués (DFG), Berkefeld (bis 30.11.), Cretton (ab 1.9.), Mori (bis 31.7.), Fockenbrock (bis 30.4.), Heraudeau, Kessel (DFG), Kroupa (ab 1.11.), Maciejewski (bis 8.11.), Nelson, Porro (bis 14.10.), Robberto (bis 30.4.), Thiering, Woitas (ab 1.11.) Chr. Wolf (SFB), Xu (ab 1.2.).

Gäste: Courteau, Victoria/Canada (Aug), Cretton, Leiden (Feb/Mär), Guivarch, Marseille (Mai), Hensler, Kiel (Nov/Dez), Hozumi, Japan (Juni), Januzi, Tucson (Jul/Aug), McIntosh, Tucson (Jul/Aug), Sarzi, Padova (ab Aug), Steinmetz, Tucson (Jul/Aug), O'Dell, Houston (Juli), Salucci, Triest (Okt), Shields, Athens/USA (Juni/Juli), Toth, Budapest (Jul/Aug), Travaglio, Florenz (Feb/Nov), Yahagi, Tokyo (Jul/Aug), Zheng, Baltimore (Sept).

Durch die regelmäßigen ISOPHOT-Arbeitstreffen mit den aus- und inländischen Co-Investigatoren, der beteiligten Industrie und anderen Institutionen hielten sich viele Gäste kurzfristig am Institut auf, die hier nicht im einzelnen aufgeführt sind.

Praktikanten: Matschina (15.9.-12.11.), Lösch (17.2.-26.3.), Mayer, Middelburg (17.2.-26.3.), Müller (1.5.-30.6.), Ochotta (2.8.-12.9.) Rettinghaus (9.8.-18.9.), Theuermeister (1.7.-30.9.).

Calar Alto/Almeria

Lokale Leitung: Gredel, Vives.

Astronomie, Nachtassistenten: Aceituno, Aguirre, Alises, Frahm, Hoyo, Marcos, Montoya, Pedraz (ab 1.1.) Prada (ab 1.2.), Quesada (beurlaubt), Thiele.

Teleskoptechnik: Capel, de Guindos, Garcia, Helmling, Henschke, L. Hernández, Raúl López, Morante, W. Müller, Nuñez, Parejo, Schachtebeck, Usero, Valverde, Wilhelm.

Technischer Dienst, Hausdienst: A. Aguila, M. Aguila, Ariza, Barón, J. Braun (bis 28.2.), Carreño, Dominguez, Gómez, Góngora, Manuel Hernandez, Klee, Rosario López, Marquez, Martinez, Puertas, F. Restoy, Romero, Sáez, Sanchez, Schulz, Tapias.

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, Th. Berkefeld, T. Herbst, 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 Mass., Amherst, USA

CONICA

Rainer Lenzen, W. Benesch, P. Franke, M.A. Khan, N. Münch, N. Ortlieb, R.-R. Rohloff, C. Storz, A. Tusche, K. Wagner, in Zusammenarbeit mit: MPI für extraterrestrische Physik, Garching,

MIDI

Christoph Leinert, U. Graser, B. Grimm, T. Herbst, St. Hippler, R. Lenzen, R. Ligor, R. Mundt, N. Ortlieb, E. Pitz, I. Porro, M. Robberto, R.-R. Rohloff, N. Salm, K. Wagner in Zusammenarbeit mit: Univ. Amsterdam, Niederlande, Sterrewacht Leiden, Niederlande, Observatoire Meudon, Meudon, Frankreich, Observatoire Nice, Nizza, Frankreich, Kiepenheuer-Institut Freiburg, Thüringische Landessternwarte Tautenburg.

PACS für FIRST

Dietrich Lemke, O. Krause, U. Grözinger, S. Eckardt, U. Klaas, unter Federführung des MPI für extraterrestrische Physik, Garching, in Zusammenarbeit mit: DLR, Berlin, Universität Kaiserslautern

LAICA

Josef Fried, W. Benesch, R.-R. Rohloff, Baumeister, B. Grimm, Unser, C. Marien, Zimmermann, Briegel

Das ISO-Datenzentrum

Dietrich Lemke, ISOPHOT-PI und die ISO-Gruppe des MPIA: P. Abraham, S. Bianchi, J. de Mooij, S. Eckhardt, U. Grözinger, M. Haas, P. Heraudeau, S. Hotzel, U. Klaas, T. Kranz, O. Krause, T. Müller, M. Radovich, A. Rushworth, L. Schmidtobreick, M. Stickel, C. Surace, L.V. Toth, K. Wilke.

UKIRT-Sekundärspiegel

Ralf-Rainer Rohloff, E. Pitz, in Zusammenarbeit mit: Astronomisches Rechen-Institut, Heidelberg, Royal Observatory, Edinburgh, Joint Astronomy Center, Hilo, Hawaii.

Wissenschaftliche Arbeiten

CADIS und die Entwicklung von Galaxien

Josef Fried, B.v. Kuhlmann, K. Meisenheimer, H.-W. Rix, C. Wolf, H.H. Hippelein, M. Kümmel, S. Phleps, H.J. Röser, T. Thierring.

Astrophysik mit Gravitationslinsen

Hans-Werner Rix, in Zusammenarbeit mit: Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, USA, University of Arizona, Tucson, USA, Space Telescope Science Institute, Baltimore, USA,

Kohlenwasserstoffe – rätselhafte Akteure im Staub

Dietrich Lemke, Ch. Leinert, in Zusammenarbeit mit: Universität Helsinki, Finnland, ISO Science Operations Center, Villafranca, Spanien, Universität Paris, Frankreich, MPI für Radioastronomie, Bonn.

Staub um junge massereiche Sterne

Peter Abraham, Ch. Leinert, S. Ligor, D. Lemke, in Zusammenarbeit mit Astrophysikalischem Institut und Sternwarte Jena

Junge Planeten auf Wanderschaft

Willy Kley, in Zusammenarbeit mit: Queen Mary & Westfield College, London, UK.

Vom massearmen Stern zum Braunen Zwerg

Christoph Leinert, Jens Woitas, Reinhard Mundt, C.A.L. Bailer-Jones, in Zusammenarbeit mit: Astronomisches Rechen-Institut, Heidelberg, Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, USA, Lowell Observatory, Flagstaff, USA, Observatoire de Grenoble, Frankreich, University of California, Berkeley, USA.

Neue Altersskala für Sternhaufen

David Barrado y Navascues, in Zusammenarbeit mit: Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, USA, Observatoire de Grenoble, Frankreich.

Das Alter der »Scheibensterne« Wega, Fomalhaut und Beta Pictoris

David Barrado y Navascues, in Zusammenarbeit mit: Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, USA, University of Georgia, Athens, USA, Harvard University, Cambridge, USA,

Die Balkenstruktur im Innern der Milchstraße

Walter Dehnen

CADIS liefert Struktur der Milchstraße

Stefanie Phleps, K. Meisenheimer, C. Wolf, in Zusammenarbeit mit: Astronomisches Rechen-Institut, Heidelberg.

Zufallsdurchmusterung mit ISO

Manfred Stickel, D. Lemke, U. Klaas, in Zusammenarbeit mit: Imperial College of Science, London, UK, ESO, Garching, Astrophysikalisches Institut, Potsdam, California Institute of Technology, Pasadena, USA, ISO-Datenzentrum, Villafranca, Spanien.

Wenn Zwerggalaxien ihr Gas verlieren

Andreas Burkert, in Zusammenarbeit mit: Universität Tokio, Japan.

Wie Spiralgalaxien zu elliptischen Galaxien verschmelzen

Thorsten Naab, A. Burkert, in Zusammenarbeit mit: Center for Astrophysics, Cambridge, USA.

Staub in Quasaren

Martin Haas, S.A.H. Müller, K. Meisenheimer, U. Klaas, D. Lemke, in Zusammenarbeit mit: Universität Bochum, MPI für Radioastronomie, Bonn, Landessternwarte Heidelberg.

Störte ein naher Stern die Entstehung des Planetensystems?

Andreas Burkert, in Zusammenarbeit mit: Tokyo Institute of Technology, Tokio, Japan, Queen Mary & Westfield College, London, UK

Dunkle-Materie-Halos um Galaxien

Andreas Burkert in Zusammenarbeit mit: University of California, Berkeley, USA.

Sterndichten in elliptischen Galaxien

Andreas Burkert in Zusammenarbeit mit: Shiga University, Shiga, Japan, Kyoto University, Kyoto, Japan.

Entstehung von CH⁺ in interstellaren Wolken

Roland Gredel

Dynamik zirkumstellarer Scheiben

Andrew Nelson in Zusammenarbeit mit: Universität Bern, Schweiz, University of Arizona, Tucson, USA.

Beobachtungen von NGC 7582 mit ISOPHOT

Mario Radovich, U. Klaas, in Zusammenarbeit mit: Instituto de Astrofísica, La Laguna, Spanien.

Zusammenarbeit mit Firmen

Calar-Alto-Observatorium

DSD Dillinger Stahlbau GmbH, Saarlouis
 Fa. Endeveco, Heidelberg
 PEP Modular Computers GmbH, Kaufbeuren
 Carl Zeiss, Jena und Oberkochen

Alfa

AOA Inc., Cambridge, Massachusetts, USA
 Cambridge Innovations, Farmingham, Massachusetts, USA
 Microgate S.r.l., Bolzano, Italien,
 MIT/Lincoln Laboratory, Lexington, Massachusetts, USA
 University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts, USA

Wide Field Imager

Omega, Vermont, USA

Midi

Applied Software Technology
 BFI Optilas, Dietzenbach
 Bürklin, München
 Cryophysics, Darmstadt
 EBV-Elektronik, Leonberg;
 Edwards Hochvakuum, Marburg
 Faber Industrietechnik, Mannheim
 Geier Metallhandel
 Haefele, Schriesheim
 Janos, Townshend, Vermont, USA
 Kniel, Karlsruhe
 Knürr, Mainhausen
 Lesker, East Sussex, UK
 Leybold Vakuum, Köln
 Linos, Göttingen
 LOT Oriel
 MACCON, München
 MAXIM, Planegg
 Messer Griesheim, Krefeld
 Physik Instrumente, Waldbronn
 Raytheon, Goleta, CA, USA
 Rutronic, Ispringen
 Saskia, Ilmenau
 Schroff, Straubenhardt
 Spindler & Hoyer, Göttingen
 Stegmann, Donaueschingen
 SUN Online
 Thorlabs, Grünberg
 TRIAD Solutions, Moorpark, CA, USA
 Wizenmann, Pforzheim
 Würzburger Fotoversand, Würzburg;

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

Pacs

Alternate Computer, Linden
 ANTEC,
 AVNET, Braunschweig
 Buerklin, München
 California Fine Wire, Grover Beach, USA
 ChemPur, Karlsruhe
 Comtronic GmbH, Heiligkreuzsteinach
 CSEM, Neuchatel, Schweiz
 Cunz, Frankfurt
 ELNA Transformatoren, Sandhausen
 ESM Eberline, Erlangen
 GSF Forschungszentrum, Unterschleissheim
 Hewlett-Packard, Böblingen
 Hoschar, Karlsruhe
 HY-LINE Power Compon., Unterhaching
 IMEC, Leuven, Belgien
 Kayser-Threde, München
 MagnaC, Wendlingen
 Meilhaus Elektronik, PuchheimKarte
 Messer-Griesheim, Ludwigshafen
 Oxford Instruments, Wiesbaden
 Polytec GmbH, Waldbronn
 Rutronic GmbH, Ispringen
 Teldix, Heidelberg
 Thyssen-Krupp, Bochum
 Timet, Duesseldorf
 Vacuumschmelze, Hanau
 Zeiss, Oberkochen

Ukirt-Spiegel

Kaufmann Präzisionsoptik, Crailsheim
 Schott, Mainz
 BNM, Jena
 Carl Zeiss, Oberkochen
 Praezisionsoptik, Gera
 Physik Instrumente, Waldbronn

CCD-Technik

Dataman, Pliezhausen
 EEV Ltd., GB
 Haefele, Schriesheim.
 Heraeus, 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
 Additive, Friedrichsdorf
 Creaso, Gilching
 Draco, Hamburg
 Edo, Hockenheim
 PROUT, Darmstadt
 ProMedia, Oftersheim
 Seicom, Ismaning
 Sun, Langen
 Transtec, Tübingen

Werkstätten

ABB (ehem. Hartmann + Braun), Alzenau
 Almet-AMB, Mannheim
 Amphenol-Tuchel Electronics, Heilbronn
 APE Elektronik, Kuppenheim
 Astro- und Feinwerktechnik, Berlin
 AVIMO, Somerset, U.K.
 Best Power Technology, Erlangen
 Binder Magnete, Villingen-Schwenningen
 Börsig, Neckarsulm
 Bubbenzer Bremsen, Kirchen-Wehrbach
 Bürklin, München
 Cadillac-Plastic, Viernheim
 Carl Roth, Karlsruhe
 Cherry Mikroschalter, Auerbach
 Com Pro, Stuttgart
 Compumess Elektronik, Unterschleissheim
 C&K Components, Neuried b. München
 Comtronic GmbH, Heiligkreuzsteinach
 Conrad Electronic, Hirschau
 Cryophysics, Darmstadt
 Dalektron, Dreieich
 Dannewitz, Linsengericht
 Dürkes & Obermayer, Heidelberg
 Dyna Systems NCH, Mörfelden-Walldorf
 EBJ, Ladenburg
 EBV-Elektronik, Leonberg
 EC Motion, Mönchengladbach
 Edsyn Europa, Kreuzwertheim
 Eldon, Büttelborn
 Elna Transformatoren, Sandhausen

elspec, Geretsried
 ELV Elektronik, Leer
 ERNI, Adelberg
 eurodis Enatechnik, Quickborn
 EWF, Eppingen
 Farnell Electronic Components, Deisenhofen
 Farnell Electronic Services, Möglingen
 FCT Electronic, München
 Fischer Elektronik, Lüdenscheid
 Franke, Aalen
 FRIATEC, Mannheim
 Fritz Faulhaber, Schönaich
 Future Electronics Deutschland, Unterföhring
 Gould Nicolet Meßtechnik, Dietzenbach
 Helukabel, Hemmingen
 Herz, Leister Geräte, Neuwied
 Hewlett-Packard Direkt, Böblingen
 Holz Elektronik, Kirchheim
 Hommel-Hercules Werkzeughandel, Viernheim
 Horst Göbel, Ludwigshafen
 Horst Pfau, Mannheim
 HOT Electronic, Taufkirchen
 HTF Elektro, Mannheim
 Huber + Suhner, Taufkirchen
 IBF Mikroelektronik, Oldenburg
 Inkos, Reute/Breisgau
 iSystem, Dachau
 ITE, Sandhausen
 Jacobi Eloxal, Altlussheim
 Jarmyn, Limburg
 Kniel, Karlsruhe
 Knürr, München
 Lambda Electronics, Achern
 Lemo Elektronik, München
 LPKF CAD/CAM Systeme, Garbsen
 Macrotron, München
 Matsuo Electronics Europe, Eschborn
 Matsushita Automation, Holzkirchen
 Maxim Ges. f. elektronische integrierte Bausteine, Planegg
 Menges electronic, Dortmund
 Metrofunkkabel-Union, Berlin
 Mitsubishi-Electric, Weiterstadt
 MSC Vertriebs-GmbH, Stutensee
 MTI, Baden-Baden
 Nanotec, Finsing
 Nickel Schalt- und Meßgeräte, Villingen-Schwenningen
 Niebuhr Optoelectronic, Hamburg
 Nies Electronic, Frankfurt
 Nova Elektronik, Pulheim
 Otto Faber, Mannheim
 Parametric Technology, Muenchen
 Physik Instrumente, Waldbronn
 pbe Electronic, Elmshorn
 Phyttec Meßtechnik, Mainz
 Plastipol, Runkel
 PSI Tronix, Tulare, California, USA

Püschel Elektronik, Mannheim
R.E.D. Regional-Electronic-Distribution, Rodgau-Jügesheim
Radiall, Rödermark
Rau-Meßtechnik, Kelkheim
Reinhold Halbeck, Offenhausen
Retronic, Ronneburg
Riekert & Sprenger, Wertheim
Rittal-Werk, Herborn
Roland Häfele Leiterplattentechnik, Schriesheim
RS Components, Mörfelden-Walldorf
Rufenach Vertriebs-GmbH, Heidelberg
Rutronik, Ispringen
Sasco, Putzbrunn
Scantec, Planegg
Schaffner Elektronik, Karlsruhe
Schuricht, Fellbach-Schmiden
SCT Servo Control Technology, Taunusstein
SDRC, Neu-Isenburg
SE Spezial-Electronic, Bückeberg
Siemens IC-Center, Mannheim
Spindler & Hoyer, Göttingen
Spoerle Electronic, Dreieich
Synatron, Hallbergmoos
TMS Test- und Meßsysteme, Herxheim/Hayna
Tower Electronic Components, Schriesheim
TreNew Electronic, Pforzheim
TS-Optoelectronic, München
TWK-Elektronik, Karlsruhe
Vacuumschmelze, Hanau
Vero Electronics, Bremen
W. & W. Schenk, Maulbronn
Wikotec, Bramsche
Wilhelm Gassert, Schriesheim
WS CAD Elektronik, Berk Kirchen

Lehrveranstaltungen

Wintersemester 1998/99:

- I. Appenzeller: Interstellare Materie und Sternentstehung (Vorlesung)
- A. Burkert: Entstehung und Entwicklung von Kugelsternhaufen (Vorlesung)
- A. Burkert: Struktur, Kineamtik und Dynamik von Sternsystemen (Oberseminar)
- Ch. Leinert, D. Lemke, R. Mundt, H.-J. Röser: Astronomie und Astrophysik III (Seminar)
- Die Dozenten der Astronomie: Astronomisches Kolloquium.

Sommersemester 1999:

- J. Fried: Galaxien (Vorlesung)
- I. Appenzeller: Relativistische Astrophysik (Vorlesung)
- H.-J. Röser: Galaxienhaufen (Vorlesung)
- K. Meisenheimer: Galaxien extremer Rotverschiebung (Vorlesung)
- Ch. Leinert, D. Lemke, R. Mundt: Astronomie und Astrophysik III (Seminar)
- K. Meisenheimer: Stelldynamik (Seminar)
- A. Burkert: Beschleunigung, Ausbreitung und Strahlung; relativistischer Teilchen in hochrotverschobenen Radiogalaxien (Seminar)
- H.-W. Rix: Kosmologie (Graduiertenkurs, Oktober 1999)
- Die Dozenten der Astronomie: Astronomisches Kolloquium.

Öffentliche Vorträge

- S. Beckwith: Science with the NGST: 22. Januar, Space Telescope Science Institute, ADM Division, Baltimore; Space Science Update: 9. Februar, NASA Television Production on Protoplanetary Disks, Washington; Extrasolar Planetary Systems: 18. Februar, UVOIR Untergrremium des Untersuchungskomitees Astronomy and Astrophysics, Baltimore; Wide Field Planetary Camera 3 IR: 22 Februar, Origins Unterkomitee, Cocoa Beach; From the Big-Bang to Life: 16 März, Kent Island Social Group, Kent Island; The Hubble Space Telescope: 15 April, Maryland Sciene Ceter Opening, Baltimore; Air, Space and the Search for Distant Planets: 20 April, American Geophysical Union, Annapolis; Astronomy from Space: 21 April, Boston Museum of Science, Boston; STScI and Goddard Space Flight Center: Opportunities for Science: 9. Juni, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, USA
- H. Elsässer: Neue Wege und Ziele der Astronomie: 19. Januar, Urania Berlin, 16. Februar, Witheit Olbers Ges. Bremen, 6. Dezember Univ. Hohenheim, Studium Generale; Aktuelle Fragen der extragalaktischen Forschung: 20 Januar, Wilhelm-Foerster-Sternwarte, Berlin; Entwicklung und Entstehung von Galaxien: 2. Februar, Physikalisches Kolloquium, Dresden; Bau und Entwicklung des Universums: 22. September, Wissenschaft im Rathaus, Dresden
- J. Fried: Astologie – Wissenschaft oder Aberglaube? 15. Dezember 1999, Rüsselsheim
- T. Herbst: New Eyes for the New Millenium: A Revolution in Large Telescope Design, Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg, (Lehrerkurs), Oktober 1999
- S. Hippler und S. Rabien: Scharfe Bilder: Adaptive Optik mit dem Laser-Guide-Star. Radiosendung »Radius« des Bayerischen Rundfunks (Bayern 2), 8. November 1999
- K. Meisenheimer: Die ersten Galaxien, Rüsselsheim, 17. September 1999
- J. Staude: Entstehung von Sternen und Planetensystemen, Vorträge in Heidelberg, Heppenheim, Rüsselsheim, sowie fünf Schulvorträge in Dortmund und Umgebung.

Tagungen

- Arcetri Astrophys. Observatorium, Florenz, Italien, Januar: M. Haas (eingeladener Vortrag).
- American Astronomical Society, Austin, USA, Januar: S. Beckwith (Vortrag)
- Astronomisches Kolloquium der Hamburger Sternwarte, Januar: Chr. Wolf (eingeladener Vortrag)
- Kolloquium der University of Chicago, Januar: A. Burkert
- Freitagskolloquium der Universitäts-Sternwarte, München, Februar: St. Phleps, (eingeladener Vortrag)
- Optical Astronomers' Tea, Pasadena, USA, März: Chr. Wolf (Vortrag)
- VLT Opening Symposium, Antofagasta, Chile, März: R. Lenzen
- Konferenz Optical and Infrared Spectroscopy of Circumstellar Matter, Tautenburg, März: T. Herbst (eingeladener Vortrag), R. Gredel (eingeladener Vortrag)
- Kolloquium an der Universität Leiden, März: T. Herbst
- Rencontres de Moriond – Building Galaxies: From the Primordial Universe to the Present, Les Arcs, France, März: H.-W. Rix (eingeladener Vortrag)
- Konferenz Imaging the Universe in Three Dimensions: Astrophysics with Advanced Multi-wavelength Imaging Devices, Walnut Creek, CA, USA, März: T. Herbst (Poster), Chr. Wolf (Vortrag)
- 26th Saas Fee Advanced Course: Physics of Star Formation in Galaxies, Les Diablerets, Schweiz, März: J. Woitas
- Meeting on Galaxy Dynamics, Venedig, Italien, März: N. Cretton (eingeladener Vortrag)
- Workshop on NGST Detectors, Baltimore, USA, April: S. Beckwith (Vortrag)
- Kolloquium an der Universität Tübingen, April: A. Burkert
- New York University, New York, USA, April: S. Beckwith (Vortrag)
- Konferenz Instrumentation at the Isaac Newton Group -- The Next Decade, Sheffield, UK, April: R. Gredel (eingeladener Vortrag)
- Physikalisches Kolloquium, Universität Köln, April: D. Lemke (eingeladener Vortrag).
- Astronomisches Kolloquium, Universität Helsinki, Finnland, April: D. Lemke (eingeladener Vortrag).
- Symposium an der Cornell University zum 60. Geburtstag von Yervant Terzian, Ithaca, USA, Mai: S. Beckwith (Vortrag)
- Eurokonferenz Stellar Clusters and Associations: Convection, Rotation, and Dynamos, Palermo, Italien, Mai: D. Barrado y Navascués (Vortrag und Poster)
- Institute for Astronomy, Cambridge, United Kingdom, Mai: A. Burkert
- Workshop on ISO Polarization Observations, VILSPA, Mai: U. Klaas (Vorträge).
- Konferenz Working on the Fringe – An International Conference on Optical and IR Interferometry from Ground and Space, Dana Point, USA, Mai: S. Ligori, S. Hippler, M. Kasper, I. Porro, M. Ollivier
- Ringberg-Tagung über Satellite Galaxies, Juni: A. Burkert (eingeladener Vortrag)
- Astronomisches Kolloquium, Universität Basel, Juni: H.-W. Rix (eingeladener Vortrag)
- Heidelberger Kolloquium des Physikalischen Instituts, Universität Heidelberg, Juni: H.-W. Rix (eingeladener Vortrag)
- Conference on Gravitational Lensing: Recent Progress and Future Goals, Boston University, Boston, Juni: H.-W. Rix (Vortrag)
- Kolloquium am Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, Juni: K. Meisenheimer (eingeladener Vortrag)
- Gordon Konferenz Origins of the Solar System, USA, Juni: Nelson (eingeladener Vortrag und Poster)
- American Astronomical Society Meeting, Chicago, USA, Juni: D. Barrado y Navascués (Poster)
- Konferenz Star Formation, Nagoya, Japan, Juni: A. Nelson und S. Ligori (Poster)
- Konferenz Early Stages of Globular Clusters, Lüttich, Belgien, Juli: A. Burkert (eingeladener Vortrag)
- IAP-Tagung Dynamics of Galaxies, Paris, Juli: A. Burkert
- Clustering at High Redshift, Marseille, Juni/Juli: H.-J. Röser
- Joint Astronomical Center Hilo, Hawaii, Juli: M. Haas (Vortrag)
- Universität Honolulu, Juli: M. Haas (eingeladener Vortrag)
- SPIE-Konferenz Infrared Spaceborne Remote Sensing VII, Denver, USA, Juli: D. Lemke (eingeladener Vortrag)
- Canterbury Conference on Wavefront Sensing and its Applications, Canterbury, UK, Juli: M. Kasper, S. Hippler, Th. Berkefeld, M. Feldt (Vorträge)
- AIP, Potsdam, Juli: M. Haas (eingeladener Vortrag)
- UCSC Summer Workshop Structures of dark matter halos, Santa Cruz, CA., USA, August: A. Burkert (eingeladener Vortrag)
- IAU Symposium 197, Astrochemistry: From Molecular Clouds to Planetary Systems, Sogwipo, S. Korea, August: R. Gredel (Poster)
- Ringberg-Symposium Galaxies in the Young Universe II, August: H.-J. Röser (SOC), Chr. Wolf (Vortrag), B. v. Kuhlmann, K. Meisenheimer (SOC, Vortrag), St. Phleps, H. Hetzner, H. Hippelein (SOC), H.-W. Rix (Vortrag)
- Black Hole Workshop, München, September: H.-W. Rix (Vortrag)

- Astronomische Gesellschaft, Tagung, Göttingen, ISO-Splintertreffen Galaxien im Infraroten, September: D. Lemke (Organisation); U. Klaas, L. Schmidtbreich (eingeladene Vorträge); M. Geyer, B. v. Kuhlmann, M. Haas, S. Hotzel (Poster); M. Kümmel, H. Hetznecker
- International School of Space Science: High Resolution Observations in Astronomy, L'Aquila, Italien, September: S. Ligori
- Tagung Modern Theories of Large Scale Structure, Porto, September: H. Hetznecker (Poster)
- Plasma Turbulence and Energetic Particles in Astrophysics, Krakow, Polen September: F. Heitsch
- Workshop on Galactic Disks 99, organisiert vom MPIA und dem Research Center for Astronomy and Applied Mathematics of the Academy of Athens, Heidelberg, Oktober: H.-W. Rix (SOC, Vortrag), Panos Patsis (Vortrag), A. Burkert (Vortrag), W. Dehnen (Vortrag), P. Héroudeau (Poster), R. Jesseit, T. Kranz (Poster), S. Khochfar, T. Naab (Poster), K. Wilke (Poster)
- R. Gredel war im Oktober als visiting scholar der Nagoya City University in Nagoya, Japan (Vorträge in Nagoya University und Nobeyama Millimetre Observatory)
- Milky Way Magnetic Field Mapping Mission (M4), Workshop, Boston, USA, Oktober: U. Klaas (Vortrag).
- Meeting in Honour of the 65th Birthday of Prof. Martinet, Genf, Schweiz, Oktober: N. Cretton
- The Second Annual Meeting of the European Star and Planet Formation Network, Puerto de La Cruz, Teneriffa, Spanien, Oktober: F. Heitsch, O. Kessel-Deynet, A. Burkert (Vortrag),
- The 11th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun, Teneriffa, Spanien, Oktober: C. Bailer-Jones, R. Mundt, D. Barrado y Navascués (Vortrag und Poster)
- Division of Planetary Sciences of the American Astronomical Society annual meeting, Padua, Italien, Oktober: P. Ábrahám (Poster)
- Kolloquium am Institute for Astronomy, Cambridge, United Kingdom, November: A. Burkert
33. ESLAB Symposium: Star Formation from the Small to the Large Scale, ESTEC, Noordwijk, Niederlande, November: F. Heitsch; P. Ábrahám, S. Hotzel (Poster).
- Centre Européen Astronomique, Saclay, November: M. Haas (eingeladener Vortrag).
- Darwin and Astronomy, Stockholm, November: T. Herbst (Mitglied des wissenschaftlichen Organisationskomitees, Vortrag)
- XI. Canary Islands Winter School of Astrophysics Galaxies at High Redshift, November: B. v. Kuhlmann (Poster)
- Ringberg-Symposium ISO surveys of a dusty universe, November: D. Lemke (SOC), U. Klaas, M. Stickel, K. Wilke (LOC); M. Stickel (eingeladener Vortrag); M. Haas, S. Hotzel (Poster).
- Universität Padua, Dezember: M. Haas (eingeladener Vortrag).
- Dynamic Models of Early-Type Galaxies, Straßburg, Dezember: N. Cretton (eingeladenes Seminar)

Mitarbeit in Gremien

- R. Gredel: Mitglied des Programmausschusses für den Calar Alto
- T. Herbst: Mitglied der Scientific Advisory Group für das Darwin Projekt der ESA, des VLTI MIDI-Teams, der LBT Near IR Spectroscopy-Arbeitsgruppe; er organisierte die Sitzung LBT Interferometry and Adaptive Optics und nahm an der Sitzung des Science Advisory Committee der LBT Corporation teil.
- Ch. Leinert: Mitglied der Berufungskommission der Universität Jena für die C3-Stelle Astrophysik.
- D. Lemke: Mitglied des Gutachterausschusses Verbundforschung Astrophysik des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und des ISO Science Teams der European Space Agency.
- K. Meisenheimer: Mitglied der Arbeitsgemeinschaft Surveys der ESO.
- R. Mundt: Mitglied des Calar-Alto-Programmausschusses
- H.-W. Rix leitete die Organisation des German-American Frontiers of Science Meeting, das im Sommer 2000 von der Humboldt-Stiftung und der National Academy of Science veranstaltet wird; er war Mitglied des VLTI-Steering Committees, des Sloan Digital Sky Survey (SDSS) Council und des Astronomy Working Group der ESA.
- H.-W. Rix und A. Burkert waren Mitglieder im Ausschuss Denkschrift Astronomie des Rates Deutscher Sternwarten.

Veröffentlichungen

- Ábrahám, P., Ch. Leinert and D. Lemke: Interplanetary Dust as Seen in the Zodiacal Light with ISO. In: *Solid Interstellar Matter: The ISO Revolution*, Les Houches No.11, (Eds.) L. D'Hendecourt, C. Joblin, A. Jones. EDP Sciences, Springer, Berlin 1999. 3.
- Ábrahám, P., Ch. Leinert, J. Acosta-Pulido and D. Lemke: The Mid-infrared Spectrum of the Zodiacal Light Observed with ISO-PHOT. *Bulletin of the American Astronomical Society* 31 (1999) 1591.
- Ábrahám, P., A. Burkert, Ch. Leinert, D. Lemke and Th. Henning: Far-Infrared mapping of Herbig Ae/Be stars with ISO. In: *Proceedings of conference »The Universe as seen by ISO«*, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 265–268.
- Ábrahám, P., Ch. Leinert, J. Acosta-Pulido, L. Schmidtobreick and D. Lemke: Zodiacal light observations with ISOPHOT. In: *Proceedings of conference »The Universe as seen by ISO«*, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 145–148.
- Ábrahám, P., Ch. Leinert, A. Burkert, D. Lemke and Th. Henning: Search for cool circumstellar matter in the Ursae Majoris Group with ISO. In: *Proceedings of conference »The Universe as seen by ISO«* Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 261–264.
- Acosta-Pulido, J. A., U. Klaas and R. J. Laureijs: The Starburst Galaxy NGC 6090: An ISO view. In: *Proceedings of conference »The Universe as seen by ISO«*, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 849–852.
- Appenzeller, I.: The Demise of Spherical and Stationary Winds. In: *Variable and Non-spherical Stellar Winds in Luminous Hot Stars*, (Eds.) B. Wolf, O. Stahl, A. W. Fullerton. IAU Colloquium 169, Springer, Berlin 1999, 416–422.
- Baade, D., K. Meisenheimer, O. Iwert, J. Alonso, Th. Augusteijn, J. Beletic, H. Bellemann, W. Benesch, A. Böhm, H. Böhnhardt, J. Brewer, S. Deiries, B. Delabre, R. Donaldson, Ch. Dupuy, P. Franke, R. Gerdes, A. Giliotte, B. Grimm, N. Haddad, G. Hess, G. Ihle, R. Klein, R. Lenzen, J.-L. Lizon, D. Mancini, N. Münch, A. Pizarro, P. Prado, G. Rahmer, J. Reyes, F. Richardson, E. Robledo, F. Sanchez, A. Silber, P. Sinclair, R. Wackermann, S. Zaggia: The Wide Field Imager at the 2.2m MPG/ESO Telescope: First Views with a 67-Million-Facette Eye. *The Messenger* 95, 15–17 (1999).
- Bailer-Jones, C. A. L. and R. Mundt: A Search for Variability in Brown Dwarfs and L Dwarfs. *Astronomy and Astrophysics* 348, 800–804 (1999).
- Bailer-Jones, C. A. L., H. K. D. H. Bhadeshia and D. J. C. MacKay: Gaussian Process Modelling of Austenite Formation in Steel. *Materials Science and Technology* 15, 287–294 (1999).
- Barnstedt, J., N. Kappellmann, I. Appenzeller, A. Fromm, M. Gözl, M. Grewing, W. Gringel, C. Haas, W. Hopfensitz, G. Krämer, J. Krautter, A. Lindenberger, H. Mandel and H. Widmann: The ORFEUS II Echelle Spectrometer: Instrument Description, Performance and Data Reduction. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* 134, 561–567 (1999).
- Barrado y Navascués, D.: Lithium and Binarity. In: *The 10th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun*, (Eds.) R. Donahue, J. Bookbinder. Conference Series 154, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 1998, 894–903.
- Barrado y Navascués, D.: The Age of Beta Pic Type Stars: Vega, Fomalhaut, Beta Pic and HR 4796. *Astrophysics and Space Sciences* 263, 235–238 (1999).
- Barrado y Navascués, D., J. R. Stauffer and J. Bouvier: Brown Dwarfs and Very Low Mass Stars: Towards a New Age Scale for Young Open Clusters. *Astrophysics and Space Science* 263, 239–242 (1999).
- Barrado y Navascués, D., J. R. Stauffer and B. Patten: The Lithium-Depletion Boundary and the Age of the Young Open Cluster IC 2391. *The Astrophysical Journal* 522, L53–L56 (1999).
- Barrado y Navascués, D., J. R. Stauffer, J. Bouvier and E. L. Martin: The Mass Function at the End of the Main Sequence: The M 35 Open Cluster. *Astrophysics and Space Science* 263, 303–306 (1999).
- Barrado y Navascués, D., J. R. Stauffer, I. Song and J.-P. Caillault: The Age of Beta Pictoris. *The Astrophysical Journal* 520, L123–L126 (1999).
- Barth, A. J. H.-W. Rix, L. C. Ho, A. V. Filippenko and W. L. W. Sargent: Ionized Gas Kinematics and the Central Mass of NGC 3245. *American Astronomical Society Meeting* 195 1999) 115.11.
- Bastian, U., W. Dehnen and E. Schilbach: A »DIVA« for Observational Stellar Dynamics. In: *Schielicke, R. E. (Ed.). Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 31.
- Bennert, N., I. König, W. Hovest, M. Nielbock, T. Jürges, K. Rösler, M. Pohlen, C. Tappert, R. Vnscheidt, J. Sanner, D. Münstermann, D. Reymann, A. Hovest and L. Schmidtobreick: Astrometry of Several Comets. In: *Schielicke, R. E. (Ed.), Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 94.
- Bechtold, J., K. Enniko, T. P. Greene, J. H. Burge, M. J. Rieke, G. H. Rieke, H.-W. Rix, E. T. Young, M. P. Lesser, R. Sarlot, J. R. Angel, D. W. McCarthy, L. Lesyna, K. Triebes and J. E. Gunn: The University of Arizona/Lockheed Martin Conceptual Study of the NGST Science Instrument Module. *American Astronomical Society Meeting* 194 (1999), 91.14.
- Beckwith, S. V. W.: Circumstellar Disks. In: *The Origin of Stars and Planetary Systems*, (Eds.) C. J. Lada, N. D. Kylafis. NATO Science Series 540, Kluwer, Dordrecht 1999, 579.
- Berkefeld, T.: Possibilities and Performance of Multi-Conjugate Adaptive Optics. *Bulletin of the American Astronomical Society* 31 (1999), 837.
- Bodenheimer, P., H. Yorke and A. Burkert: Formation of Disks and Binaries. In: *Proceedings of the International Conference on Numerical Astrophysics*, Tokyo 1998. (Eds.) Shoken M. Miyama, Kohji Tomisaka, Tomoyuki Hanawa. Kluwer, Boston 1999, 123.
- Böhnhardt, H., N. Rainer, K. Birkle and G. Schwehm: The Nuclei of Comets 26P/Grigg-Skjellerup and 73P/Schwassmann-Wachmann 3. *Astronomy and Astrophysics* 341, 912–917 (1999).
- Böhnhardt, H., K. Birkle, A. Fiedler, L. Jorda, S. Peschke, H. Rauer, R. Schulz, G. Schwehm, N. Thomas, G. Tozzi and R. West: Dust Morphology of Comet Hale-Bopp (C/1995 01): I. Pre-Perihelion Coma Structures in 1996. *Earth, Moon and Planets* 78, 179–187 (1999).
- Burkert, A.: The Formation of Brown Dwarfs by Fragmentation. In: *Schielicke, R. E. (Ed.). Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 18.
- Burkert, A., J. Silk: On The Structure and Nature of Dark Matter Halos. In: *Dark Matter in Astro and Particle Physics*, (Eds.) H. V.

- Klapdor-Kleingrothaus, L. Baudis. Institute of Physics Publishing, Bristol 1999, 375–386.
- Butler, D. J., R. I. Davies, H. Fewes, W. K. Hackenberg, S. Rabien, Th. Ott, A. Eckart and M. Kasper: Calar Alto ALFA and the Sodium Laser Guide Star in Astronomy. In: Adaptive Optics Systems and Technology, (Eds.) R. K. Tyson, R. Q. Fugate. Proceedings of the SPIE 3762, SPIE Bellingham 1999, 184–193.
- Castro-Tirado, A. J., J. Gorosabel, E. Costa, M. Feroci, L. Piro, F. Frontera, D. dal Fiume, L. Nicastro, E. Palazzi, J. Greiner, K. Birkle, R. Fockenbrock, E. Thommes, Chr. Wolf, C. Bartolini, A. Guarnieri, N. Masetti, A. Piccioni, M. Mignoli, J. Heidt, T. Seitz, H. Pedersen, S. Guziy, A. Shlyapnikov, L. Metcalfe, R. Laureijs, B. Altieri, M. Kessler, L. Hanlon, B. McBreen, N. Smith, J. Studt, N. Benítez, E. Martínez-González, H. Kristen, A. Broeils, M. Wold, M. Lacy, and M. V. Alonso: Optical/IR Follow-Up Observations of GRBS Detected by BEPOSAX. In: Gamma-Ray Bursts: 4th Huntsville Symposium, (Eds.) Ch. A. Meegan R. D. Preece, Th. M. Koshut. Woosbury New York: Conference Proceedings 428, AIP, San Francisco 1998, 489.
- Castro-Tirado, A. J., M. Zapatero-Osorio, N. Caom, M. C. Luz, J. Hjorth, H. Pedersen, M. I. Andersen, J. Gorosabel, C. Bartolini, A. Piccioni, F. Frontera, N. Masetti, E. Palazzi, E. Pian, J. Greiner, R. Hudec, R. Sagar, A. K. Pandey, V. Mohan, R. K. S. Yadav, N. Nilakshi, G. Bjornsson, P. Jakobsson, I. Burud, F. Courbin, Gaetano, A. Piersimoni, J. Aceituno, L. M. Montoya, S. Pedraz, R. Gredel, Ch. F. Claver, T. A. Rector, J. E. Rhoads, F. Walter, J. Ott, H. Hippelein, V. Sanchez-Bejar, C. Gutierrez, A. Oscoz, J. Zhu, J. Chen, H. Zhang, J. Wei, A. Zhou, S. Guziy, A. Shlyapnikov, J. Heise, E. Costa, M. Feroci and L. Piro: Decay of the GRB 990123 Optical Afterglow: Implications for the Fireball Model. *Science* 283, 2069–2073 (1999).
- Castro-Tirado, A. J., M. R. Zapatero-Osorio, J. Gorosabel, J. Greiner, J. Heidt, D. Herranz, S. N. Kemp, E. Martínez-González, A. Oscoz, V. Ortega, H.-J. Röser, Chr. Wolf, H. Pedersen, A. O. Jaunsen, H. Korhonen, I. Ilyin, R. Duemmler, M. I. Andersen, J. Hjorth, A. A. Henden, F. J. Vrba, J. Fried, F. Frontera and L. Nicastro: The Optical/IR Counterpart of the 1998 July 3 Gamma-Ray Burst and Its Evolution. *The Astrophysical Journal* 511, L85–L88 (1999).
- Ciliegi, P., R. G. McMahon, G. Miley, C. Gruppioni, M. Rowan-Robinson, C. Cesarsky, L. Danese, A. Franceschini, R. Genzel, A. Lawrence, D. Lemke, S. Oliver, J.-L. Puget and B. Rocca-Volmerange: A Deep VLA Survey at 20 cm of the ISO ELAIS Survey Regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 302, 222–244 (1999).
- Cinzano, O., H.-W. Rix, M. Sarzi, E. Corsini, W. Zeilinger and F. Bertola: The Kinematics and Origin of the Ionized Gas in NGC 4036. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 307, 433–448 (1999).
- Courteau, S. and H.-W. Rix: Maximal Disks and the Tully-Fisher Relation. *The Astrophysical Journal* 513, 561–571 (1999).
- Cox, D. P., R. L. Shelton, W. Maciejewski, R. K. Smith, T. Plewa, A. Pawl and M. Rózczyka: Modeling W 44 as a Supernovae Remnant in a Density Gradient with a Partially Formed Dense Shell and Thermal Conduction in the Hot Interior. I. The Analytical Model. *The Astrophysical Journal* 524, 179–191 (1999).
- Cretton, N. and F. van den Bosch: Evidence for a Massive Black Hole in the S0 Galaxy NGC 4342. *The Astrophysical Journal* 514, 704–724 (1999).
- Cretton, N. P. T. de Zeeuw, R. P. van der Marel and H.-W. Rix: Axisymmetric Three-Integral Models for Galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement* 124, 383–401 (1999).
- Davies, R. I., W. Hackenberg, T. Ott, A. Eckart, S. Rabien, S. Anders, S. Hippler, M. Kasper, P. Kalas, A. Quirrenbach and A. Glindemann: The Science Potential of ALFA: Adaptive Optics with Natural and Laser Guide Stars. *Astronomy and Astrophysics, Supplement Series* 138, 345–353 (1999).
- Dehnen, W.: The Pattern Speed of the Galactic Bar. *The Astrophysical Journal* 524, L35–L38, 1999.
- Dehnen, W.: Simple Distribution Functions for Stellar Disks. *The Astronomical Journal* 118, 1201–1208, 1999.
- Dehnen, W.: Approximating Stellar Orbits: Improving on Epicycle Theory. *The Astronomical Journal* 118, 1190–1200, 1999.
- Dehnen, W.: The Distribution of Nearby Stars in Velocity Space. In: *Galaxy Dynamics*, (Eds.) D. R. Merritt, M. Valluri, J. A. Sellwood. Conference Series 182, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 1999, 297–301.
- Dietrich, M., I. Appenzeller, S. J. Wagner, W. Gässler, R. Häfner, H.-J. Hess, W. Hummel, B. Muschelok, H. Niclas, G. Rupprecht, W. Seifert, O. Stahl, T. Szeifert and K. Tarantik: Spectroscopic Study of High Redshift Quasars. *Astronomy and Astrophysics* 352, L1–L4 (1999).
- Moorwood, S. Oliver, W. T. Reach, M. Rowan-Robinson and M. Stickle: FIRBACK far infrared survey with ISO: Data reduction, analysis and first results. In: Proceedings of conference »The Universe as seen by ISO«, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 1031–1036.
- Eckart, A., R. I. Davies, W. Hackenberg, T. Ott, S. Rabien, S. Hippler, M. Kasper, P. Kalas, K. Wagner and R.-R. Rohloff: Status of the ALFA Project. *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 14 (1998), 69.
- Falco, E., C. Impey, C. Kochanek, J. Lehar, B. McLeod, H.-W. Rix, C. Keeton, J. Muñoz and C. Peng: Dust and Extinction Curves in Galaxies with $z > 0$: The Interstellar Medium of Gravitational Lenses. *The Astrophysical Journal* 523, 617–632 (1999).
- García-Berro, E., S. Torres, J. Isern and A. Burkert: Monte Carlo Simulations of the Disc White Dwarf Population. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 302, 173–188 (1999).
- Geyer, M. P. and A. Burkert: Gas Expulsion from Young Globular Clusters. In: Schielicke, R. E. (Ed.). *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 117.
- Gorosabel, J., A. J. Castro-Tirado, H. Pedersen, D. Thompson, M. Guerrero, A. Oscoz, N. Sabalick, E. Villaver and N. Lund: Optical and Near-infrared Observations of the GRB 970615 Error Box. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* 138, 455–456 (1999).
- Gredel, R.: Interstellar C₂ Absorption Lines Towards CH⁺ Forming Regions. *Astronomy and Astrophysics* 351, 657–668, 1999.
- Gredel, R.: Interstellar CH⁺ – An Outstanding Enigma. In: *Millimeter-Wave Astronomy: Molecular Chemistry and Physics in Space*, Proceedings of the 1996 INAOE Summer School of Millimeter-Wave Astronomy, Mexico 1996, (Eds.) W.F. Wall, A. Carramiñana, L. Carrasco. Kluwer, Dordrecht 1999, 369–378.
- Gredel, R.: Chemical Signatures of Turbulence. In: *Optical and Infrared Spectroscopy of Interstellar Matter*, (Eds.) E. Guenther, B. Stecklum S., S. Klose. Conference Series 108, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 1999, 187–196.
- Gredel, R.: Interstellar C₂ and CN Absorption Lines Towards CH⁺ Forming Regions. In: *IAU Symposium 197, Abstract Book*, 1999, 151–152.
- Gredel, R., S. Tiné, S. Lepp and A. Dalgarno: The Excitation of Molecular Hydrogen in XDRs. In: *Millimeter-Wave Astronomy: Molecular Chemistry and Physics in Space*, Proceedings of the 1996 INAOE Summer School of Millimeter-Wave Astronomy, Mexico 1996, (Eds.) W.F. Wall, A. Carramiñana, L. Carrasco. Kluwer, Dordrecht 1999, 247–256.
- Grosbol, P. and P. Patsis: Three-Armed Galaxy NGC 7137. In: *Galaxy Dynamics*, (Eds.) D. R. Merritt, M. Valluri, J. A. Sellwood. Conference Series 182, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 1999, 217–218.

- Grün, E., S. B. Peschke, M. Stickel, T. G. Müller, H. Krüger, H. Bönhhardt, T. Y. Brooke, H. Campins, J. Crovisier, M. S. hanner,, I. Heinrichsen, H. U. Keller, R. Knacke, P. Lamy, Ch. Leinert, D. Lemke, C. M. Lisse, M. Muller, D. J. Osip, M. Solc, M. Sykes, V. Vanysek, J. Zarnecki: ISOPHOT Observations of Comet Hale-Bopp: Initial Data reduction. In: Proceedings of conference »The Universe as seen by ISO«, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 181–184.
- Gruppioni, C., P. Ciliegi, M. Rowan-Robinson, L. Cram, A. Hopkins, C. Ceasarsky, L. Danese, A. Franceschini, R. Genzel, A. Lawrence, D. Lemke, R. G. McMahon, G. Miley, S. Oliver, J.L. Puget and B. Rocca-Volmerange: A 1.4-GHz Survey of the Southern European Large-Area ISO Survey Region. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 305, 297–308 (1999).
- Gürtler, J., K. Schreyer, Th. Henning, W. Pfau and D. Lemke: Infrared Bands Towards Young Stars in Chamaeleon. *Astronomy and Astrophysics* 346, 205–210 (1999).
- Haas, M., D. Lemke, M. Stickel, H. Hippelein, M. Kunkel, U. Herbstmeier and K. Mattila: Cold Dust in the Andromeda Galaxy mapped by ISO. In: Proceedings of conference »The Universe as seen by ISO«, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 885–886.
- Haas, M. R. Chini, K. Meisenheimer, M. Stickel, D. Lemke, U. Klaas, E. Kreysa and S. Müller: On the far infrared emission of quasars. In: Proceedings of conference »The Universe as seen by ISO«, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 887–888.
- Haas, M., S. A. H. Müller, R. Chini, K. Meisenheimer, U. Klaas, D. Lemke, E. Kreysa and M. Camenzind: Dust in PG Quasars. In: Schielicke, R. E. (Ed.): *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), P96.
- Heidt, J., K. Nilsson, J. Fried, L. Takalo and A. Sillanpää: IES 1741+196: a BL Lacertae Object in a Triplet of Interacting Galaxies? *Astronomy and Astrophysics* 348, 113–116 (1999).
- Heidt, J., K. Nilsson, I. Appenzeller, K. Jäger, W. Seifert, T. Szeifert, W. Gässler, R. Häfner, W. Hummel, B. Muschelok, H. Nicklas and O. Stahl: Observations of the Host Galaxies of the BL Lacertae Objects H0414+009 and OJ 287 with FORS 1 at VLT-UT1. *Astronomy and Astrophysics* 352, L11–L16 (1999).
- Heinrichsen, I., H. J. Walker, U. Klaas, R. J. Sylvester and D. Lemke: An Infrared Image of the Dust Disc around β Pic. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 304, 589–594 (1999).
- Heitsch, F.: Effects of Magnetized Turbulence on the Structure and Dynamical Evolution of the Molecular Clouds. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 70.
- Heitsch, F. and T. Richtler: The Metal-Rich Globular Clusters of the Milky Way. *Astronomy and Astrophysics* 347, 455–472 (1999).
- Heitsch, F., M.-M. MacLow and R. Klessen: Hydro and MHD Turbulent Support Against Gravitational Collapse. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 140.
- Heitsch, F., M.-M. MacLow and R. Klessen: Effects of Magnetized Turbulence on the Structure and Dynamical Evolution of Molecular Clouds. In: *Plasma Turbulence and Energetic Particles in Astrophysics, Proceedings of the International Conference*, (Eds.) M. Ostrowski, R. Schlickeiser. Uniwersytet Jagiellonski, Kraków 1999, 103–106.
- Henning, Th. and W. Kley: Planetenentstehung in Akkretions-scheiben. *Physikalische Blätter* 55, 47–50 (1999).
- Héraudeau, Ph., F. Simien, G. Maubon and Ph. Prugniel: Stellar Kinematic Data for the Central Region of Spiral Galaxies. II. *Astronomy and Astrophysics Supplement* 136, 506–514 (1999).
- Héraudeau, Ph., C. Surace, D. Lemke, S. Oliver, M. Rowan-Robinson and the ELAIS consortium: The European Large-Area ISO Survey: Near-Infrared follow-up observations of the southern fields. In: Proceedings of conference »The Universe as seen by ISO«, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 1041–1044.
- Herbst, T., D. Thompson, R. Fockenbrock, H.-W. Rix and S. V. W. Beckwith: Constraints on the Space Density of Methane and the Substellar Mass Function from a Deep Near-Infrared Survey. *The Astrophysical Journal* 526, L17–L20 (1999).
- Hippel, T. von and C. Bailer-Jones: Applying Parallel Network Techniques To SETI. *Bioastronomy* 99: A New Era in Bioastronomy. 6th Bioastronomy Meeting – Kohala Coast Hawaii – August 2–6, 129 (1999).
- Hotzel, S., D. Lemke, M. Stickel and L. V. Tóth: Cold Cloud Cores in Chamaeleon. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 97.
- Hotzel, S., D. Lemke, L. V. Tóth, M. Stickel, O. Krause, U. Klaas, S. Bogun, M. F. Kessler, R. J. Laurejís, M. Burgdorf, C. A. Beichmann, M. Rowan-Robinson, A. Efstathiou, G. Richter and M. Braun: Cold Spots in the Chamaeleon Dark Clouds. In: Proceedings of conference »The Universe as seen by ISO«, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 675–678.
- Howarden, T. G., N. P. Rees, T. C. Chuter, A. C. Chrysostomou, Ch. P. Cavedoni, R.-R. Rohloff, E. Pitz, D. G. Pettie, R. J. Bennett and E. Atad-Ettinger: Postupgrade Performance of the 3.8m United Kingdom Telescope (UKIRT). In: *Advanced Telescope Design, Fabrication and Control*, (Ed.) William Roybal. Proceedings of the SPIE 3785, SPIE Bellingham 1999, 82–93.
- Hozumi, S., A. Burkert and T. Fujiwara: The Origin and Formation of Cuspy Density Profiles Through Violent Relaxation of Stellar Systems. In: Proceedings of the International Conference on Numerical Astrophysics, Tokyo 1998. (Eds.) Shoken M. Miyama, Kohji Tomisaka, Tomoyuki Hanawa. Kluwer, Boston 1999, 63.
- Hujeirat, A., P. Myers, M. Camenzind and A. Burkert: Collapse of Weakly Ionized Rotating Turbulent Cloud Cores. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 16.
- Hummel, W., T. Szeifert, W. Gässler, B. Muschelok, W. Seifert, I. Appenzeller and G. Rupprecht: A Spectroscopic Study of Be Stars in the SMC Cluster NGC 330. *Astronomy and Astrophysics* 352, L31–35 (1999).
- Ibata, R., B. Richter, R. L. Gilliland and D. Scott: Faint Moving Objects in the Hubble Deep Field: Components of the Dark Halo? *The Astrophysical Journal* 524, L95–97 (1999).
- Ibata, R., H. B. Richter, G. G. Fahlmann, M. Bolte, H. E. Bond, J. E. Hesser, C. Pryor and P. B. Stetson: Hubble Space Telescope Photometry of the Globular Cluster M 4. *The Astrophysical Journal Supplement* 120, 265–275 (1999).
- Ida, S. J. Larwood and A. Burkert: Evidence for Early Stellar Encounters in the Orbital Distribution of Edgeworth-Kuiper Belt Objects. *American Astronomical Society, DPS Meeting* 31 (1999), 10.95.
- Jäger, K. J. Heidt, I. Appenzeller, R. Bender and K. J. Fricke: The FORS Deep Field (FDF) Selection and First Impressions. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 43.
- Jäger, K., K. J. Fricke, I. Appenzeller, W. Seifert, T. Szeifert, W. Gässler, R. Häfner, W. Hummel, B. Muschelok, H. Niclas and O. Stahl: Imaging and Spectroscopy with FORS1 in the Field of Q 0307-0015. *Astronomy and Astrophysics* 352, L17–21 (1999).
- Khochfar, S. and A. Burkert: Estimating Merger Probabilities of Dark Matter Halos by Use of Merger Trees. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 141.

- Kim, S. Y., M.-M. MacLow and Y.-H. Chu: Evolution of Hypernovae Remnants in the Interstellar Medium. American Astronomical Society Meeting 194 (1999), 72.04.
- Klaas, U., M. Haas and B. Schulz: Ultra-Luminous Infrared Galaxies: Far Infrared Spectral Energy Distributions. Proceedings of conference »The Universe as seen by ISO«, Paris. (Eds.) P. Cox, M. F.
- Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 901–904.
- Klaas, U., R. J. Laureijs and J. Clavel: FIR Polarization of the Quasar 3C 279. *The Astrophysical Journal* 512, 157–161 (1999).
- Klaas, U., R. J. Laureijs, T. G. Müller, E. Kreysa and W. Krätschmer: Data reduction, Calibration and Performance of the ISOPHOT Polarization Modes. In: Proceedings of the Workshop on ISO Polarization Observations, Villafranca, (Eds.) R. J. Laureijs, R. Siebenmorgen. ESA-SP-435, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 19–22.
- Klaas, U., M. Haas, S. A. H. Müller, I. M. Coulson, M. Albrecht and B. Schulz: The 10-1000 μm Spectral Energy Distributions of Ultra-Luminous IR-Galaxies. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 52.
- Klaas, U., T. G. Müller, R. J. Laureijs, J. Clavel, J. S. V. Lagerros, R. J. Tuffs, A. Moneti, E. Kreysa and W. Krätschmer: Polarization Measurements with ISOPHOT: Performance and First Results. In: Proceedings of the Conference: »The Universe as seen by ISO«, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div. Noordwijk 1999, 77–80.
- Klahr, H. H., T. Henning and W. Kley: On the Azimuthal Structure of Thermal Convection in Circumstellar Disks. *The Astrophysical Journal* 514, 325–343 (1999).
- Kley, W.: Mass Flow and Accretion through Gaps in Accretion Disks. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 303, 969–710 (1999).
- Kley, W. and Lin D. N. C.: Evolution of FU Ori Outbursts in Protostellar Disks. *The Astrophysical Journal* 518, 833–847 (1999).
- Kley, W. and G. Schäfer: Relativistic Dust Disks and the Wilson-Matthews Approach. *Physical Review* 60 27501 (1999).
- Kochanek, C., E. Falco, C. Impey, J. Lehar, B. McLeod and H.-W. Rix: Results from the CASTLES Survey of Gravitational Lenses. In: *After the Dark Ages: When Galaxies were Young (the Universe at $2 < z < 5$)*. 9th Annual October Astrophysics Conference in Maryland, (Eds.) S. Holt, E. Smith. AIP, San Francisco 1999, 163.
- Kraft, S., O. Frenzel, L. Hermans, R. Katterloher, D. Rosenthal, U. Grözinger and J. Beeman: Modular 25×16 pixel stressed array for PACS aboard FIRST. In: *Infrared Spaceborne Remote Sensing VII*, (Eds.) M. Strojnik et al. Proceedings of the SPIE 3759, SPIE, Denver 1999, 214–220.
- Krautter, J., F.-J. Zickgraf, I. Appenzeller, I. Thiering, W. Voges, C. Chavarría, R. Kneer, R. Mujica, M. W. Pakull, A. Serrano and B. Ziegler: Identification of a Complete Sample of Northern ROSAT All-Sky Survey X-Ray Sources. IV. Statistical Analysis. *Astronomy and Astrophysics* 350, 743–752 (1999).
- Krusch, E. R. Chini and M. Haas: ISO Reveals Frosty Cold Protostellar Cores. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 97.
- Kuhlmann, B. von and J. Fried: Luminosity Function of Field Galaxies Between $z = 0.2$ and 1. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), 42.
- Lagerros, J. S. V., T. G. Müller, U. Klaas and A. Erikson: ISOPHOT Polarization Measurements of the Asteroids (6) Hebe and (9) Metis at 25 μm . *Icarus* 142, 454–463 (1999).
- Langer, N., G. García-Segura and M.-M. MacLow: Giant Outbursts of Luminous Blue Variables and the Formation of the Homunculus Nebula around Eta Carinae. *The Astrophysical Journal* 520, L49–L53, (1999).
- Laureijs, R. J. and U. Klaas: Processing Steps and Signal Analysis of ISOPHOT Polarization Observations at 170 micron. In: Proceedings of the Workshop on ISO Polarization Observations, Villafranca, (Eds.) R. J. Laureijs, R. Siebenmorgen. ESA-SP-435, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 27–30.
- Lehtinen, K., D. Lemke and K. Mattila: ISOPHOT far-infrared observations of the dark cloud DC 303.8-14.2. In: Proceedings of the conference »The Universe as seen by ISO«, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 695–698.
- Leinert, Ch. and Th. Encrenaz: ISO Observations of Solar System Objects. In: *Highlights of Astronomy 11. XXIIIrd General Assembly of the IAU, 1997*, (Ed.) J. Andersen. Kluwer, Dordrecht 1998, 1151.
- Leinert, Ch. and K. Mattila: Natural Optical Sky Background. In: *Highlights of Astronomy 11. XXIIIrd General Assembly of the IAU, 1997*, (Ed.) J. Andersen. Kluwer, Dordrecht 1998, 208.
- Lemke, D.: Observations with ISOPHOT. In: *Highlights of Astronomy 11. XXIIIrd General Assembly of the IAU, 1997*, (Ed.) J. Andersen. Kluwer, Dordrecht 1998, 1116.
- Lemke, D.: Foreword. In: *Highlights of Astronomy 11. XXIIIrd General Assembly of the IAU, 1997*, (Ed.) J. Andersen. Kluwer, Dordrecht 1998, 1105.
- Lemke, D.: SPS II: Highlights in the ISO Mission. In: *Highlights of Astronomy 11. XXIIIrd General Assembly of the IAU, 1997*, (Ed.) J. Andersen. Kluwer, Dordrecht 1998, 1101.
- Lemke, D.: Infrared Astronomy with the ISO Satellite. *Cryogenics* 39, 125–133 (1999).
- Lemke, D.: Infrared Astronomy with the ISO Satellite.: In: Proceedings of the Workshop »Space Cryogenics«, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands 1998. WPP-157 1999, ISSN 1022-6656, 7–29.
- Lemke, D.: Staub, Ruß, Wasser und Eis – ISO erkundet den kalten Kosmos. *Sterne und Weltraum* 38, 754–760 (1999).
- Lemke, D.: Is small beautiful? *Sterne und Weltraum* 38, 827 (1999).
- Lemke, D.: Tiefer Blick ins kalte Universum. *Innovationen* 7, 12–17 (1999).
- Lemke, D. and U. Klaas: ISOPHOT – Performance, results and outlook. In: Proceedings of the conference »The Universe as seen by ISO« Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 51–60.
- Lemke, D., U. Grözinger, O. Krause, R. Rohloff and R. Haberland: Focal Plane Chopper for the PACS instruments aboard the Far Infrared Space Telescope FIRST. In: *Infrared Spaceborne remote Sensing VII*, (Eds.) M. Strojnik et al. Proceedings of the SPIE 3759, SPIE, Denver 1999, 205–213.
- Ligori, S., M. Robberto and T. Herbst: Mid-IR Images of W51. In: *Star Formation*, (Ed.) T. Nakamoto, Nobeyama Radio Observatory, Nagoya 1999, 377–378.
- Maciejewski, W. and D. P. Cox: Supernova Remnants in a Stratified Medium: Explicit, Analytical Approximations for Adiabatic Expansion and Radiative Cooling. *The Astrophysical Journal* 511, 792–797 (1999).
- Maciejewski, W. and L. S. Sparke: Bars within Bars in Galaxies. In: *Galaxy Dynamics*, (Eds.) D. Merritt, M. Valluri, J. Sellwood. Conference Series 182, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 1999, 245–248.
- MacLow, M.-M.: The Interaction of the Disk with the Halo. In: *New Perspectives on the Interstellar Medium*, (Eds.) A.R. Taylor, T. Landecker, G. Joncas. Conference Series 168, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 1999, 303–314.
- MacLow, M.-M.: Wolf-Rayet and LBV Nebulae as the Result of Variable and Non-Spherical Stellar Winds. In: *Variable and Non-Spherical Stellar Winds in Luminous Hot Stars*, (Eds.) B. Wolf, O. Stahl, A. W. Fullerton. IAU Colloquium 169, Springer, Heidelberg 1999, 391–399.

- MacLow, M.-M.: The Energy Dissipation Rate of Supersonic, Magnetohydrodynamic Turbulence in Molecular Clouds, *The Astrophysical Journal* 524, 169–178 (1999).
- MacLow, M.-M.: Blast Waves and Shells in the Turbulent ISM. American Astronomical Society Meeting 194 (1999), 64.08.
- MacLow, M.-M. and A. Ferrara: Starburst-Driven Mass Loss from Dwarf Galaxies: Efficiency and Metal Ejection. *The Astrophysical Journal* 513, 142–155 (1999).
- MacLow, M.-M., F. Heitsch and R. Klessen: Hydrodynamical and MHD Turbulent Support Against Gravitational Collapse. American Astronomical Society Meeting 194 (1999), 69.10.
- Mandel, H., I. Appenzeller, W. Seifert, W. Xu, T. Herbst, R. Lenzen, M. Thatte, F. Eisenhauer, R. Lemke, D. Bomans, T. Luks, P. Weiser and C. Spörl: LUCIFER – a NIR Spectrograph and Imager for the LBT. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series 15* (1999), 144.
- Mattila, K., K. Lehtinen and D. Lemke: Detection of Widely Distributed UIR Band Emission in the Disk of NGC 891. *Astronomy and Astrophysics* 342, 643–654 (1999).
- Mattila, K., K. Lehtinen and D. Lemke: Mid-Infrared Spectrophotometry of the Diffuse Disk Emission of NGC891 and its Twilling Galaxy the Milky Way. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series 15* (1999), 2.
- McIntosh, D. H., H.-W. Rix and N. Caldwell: Searching for Young S0 Galaxies in Abell 2052. American Astronomical Society Meeting 195 (1999), 10.10.
- McIntosh, D. H., H.-W. Rix, M. Riecke and C. B. Foltz: Redshifted and Blueshifted Broad Lines in Luminous Quasars. *The Astrophysical Journal* 517, L73–L76 (1999).
- McIntosh, D., M. Rieke, H.-W. Rix, C. Foltz and R. Weymann: A Statistical Study of Rest-Frame Optical Emission Properties in Luminous Quasars at $2.0 < z < 2.5$. *The Astrophysical Journal* 514, 40–67 (1999).
- Meisenheimer, K.: High-Frequency Observations and Spectrum of the Jets in M 87. In: *The Radio Galaxy Messier 87, Lecture Notes in Physics* 530, (Eds.) Röser, H.-J., K. Meisenheimer. Springer, Heidelberg 1999, 188–210.
- Möllenhoff, C., I. Appenzeller, W. Gässler, R. Häfner, J. Heidt, W. Hummel, B. Muschelok, H. Niclas, G. Rupprecht, W. Seifert, O. Stahl and T. Seifert: Morphological Structure and Colors of NGC 1232 and NGC 1288. *Astronomy and Astrophysics* 352, L5–L10 (1999).
- Mori, M. and A. Burkert: Ram Pressure Stripping of Dwarf Galaxies in a Cluster of Galaxies. *Astronomische Nachrichten* 320, 302 (1999).
- Müller, T. G., J. S. V. Lagerros and U. Klaas: Polarization Measurements of Asteroids at 25 μm with ISOPHOT. In: *Proceedings of the Workshop on ISO Polarization Observations, Villafranca*, (Eds.) R. J. Laureijs, R. Siebenmorgen. ESA-SP-435, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 31–36.
- Müller, S. A. H., M. Haas, R. Chini, K. Meisenheimer, U. Klaas, D. Lemke, E. Kreysa and M. Camenzind: Dust in PG Quasars. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series 15* (1999), 51.
- Munoz, J. A., E. E. Falco, C. S. Kochanek, J. Lehar, B. A. McLeod, C. D. Impey, H.-W. Rix and C. Y. Peng: The CASTLES Project. *Astrophysics and Space Science*, 263, 51–54, 1999.
- Muschelok, B., R. Kruditzki, I. Appenzeller, F. Bresolin, K. Butler, W. Gässler, R. Häfner, H. J. Hess., W. Hummel, D. J. Lennon, K.-H. Mantel, W. Meisl, W. Seifert, S. J. Smartt, T. Seifert and T. Tarantik: VLT FORS Spectra of Blue Supergiants in the Local Group Galaxy NGC 6822. *Astronomy and Astrophysics* 352, L40–44 (1999).
- Naab, Th. and A. Burkert: Formation of Elliptical and SO Galaxies by Close Encounters. In: *Galaxy Dynamics*, (Eds.) D. R. Merritt, M. Valluri, J. A. Sellwood. Conference Series 182, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 1999, 477–480.
- Naab, Th. and A. Burkert: Formation of Elliptical Galaxies in the Merger Scenario. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series 15* (1999), 136.
- Naab, Th., A. Burkert and L. Hernquist: On the Formation of Boxy and Disky Elliptical Galaxies. *The Astrophysical Journal* 523, L133–L136 (1999).
- Naito, T., T. Yoshida, M. Mori and T. Tanimori: Radio to TeV Gamma-ray Emission from SN 1006 and Shock Acceleration around its Rim. *Astronomische Nachrichten* 320, 205–206 (1999).
- Neistein, E., D. Maoz, W.-W. Rix and J. Tonry: A Tully-Fisher Relation for S0 Galaxies. *The Astronomical Journal* 117, 2666–2675 (1999).
- Nelson, A. and W. Benz: Towards Understanding Jovian Planet Migration. In: *Proceedings of a conference on Star Formation*, (Ed.) T. Nakamoto. Nobeyama Radio Observatory, Nagoya 1999, 251–252.
- Nieten, Ch., R. Beck, E. Berkhuijsen and M. Haas: Cold Dust in the Southwest of M 31. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series 15* (1999), 52.
- Olling, R. P. and W. Dehnen: Oort's Constants Measured from the Tycho/ACT Catalogues. *Bulletin of the American Astronomical Society Meeting* 31, (1999), 1379.
- Ossenkopf, V., F. Bensch, M.-M. MacLow and J. Stutzki: Molecular Cloud Structure Analysis by Direct Simulation. In: *The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, Proceedings of the 3rd Cologne-Zermatt Symposium 1998*, (Eds.) V. Ossenkopf, J. Stutzki, G. Winnewisser, GCA-Verlag Herdecke 1999, 216.
- Ott, J., F. Walter, U. Klein and E. Brinks: Investigating the Low Mass End of Dwarf Galaxies: The Low Surface Brightness Galaxy Holmberg I. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series 15*, G06 (1999).
- Patsis, P. A. and D. E. Kaufmann: Resonances and the Morphology of Spirals in N-body Simulations. *Astronomy and Astrophysics* 352, 469–478 (1999).
- Patsis, P. A. and D. E. Kaufmann: Signature and Density Wave Resonances in N-body Simulations of Spiral Galaxies. In: *Proceedings of the International Conference on Numerical Astrophysics, Tokyo 1998*, (Eds.) Shoken M. Miyama, Kohji Tomisaka, Tomoyuki Hanawa., Kluwer Boston 1999, 65.
- Peletier, R. F., M. Balcells, R. L. Davies, Y. Andredakis, A. Vazdekis, A. Burkert and F. Prada: Galactic Bulges from Hubble Space Telescope NICMOS Observations: Ages and Dust. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 310, 703–716 (1999).
- Peng, C. Y., C. D. Impey, E. E. Falco, C. S. Kochanek, J. Lehar, B. A. McLeod, H.-W. Rix, C. R. Keeton and J. A. Muñoz: The Quasar Pair Q 1634 + 267 A, B and the Binary QSO vs. Dark Lens Hypotheses. *The Astrophysical Journal* 524, 572–581 (1999).
- Peschke, S. B., M. Stickel, I. Heinrichsen, CM. Lisse, E. Grün and D. J. Osip: First Maps of Comet Hale-Bopp in the Far-Infrared, in Relation to Radial Profiles at other Wavelengths. In: *Proceedings of the Conference »The Universe as seen by ISO«*, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 185–188.
- Pittichová, J., Z. Sekanina, K. Birkle, H. Bönhardt, D. Engels and P. Keller: An Early Investigation of the Striated Tail of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1). *Earth, Moon and Planets* 78, 329–338 (1999).
- Philipp, S., R. Zylka, P. Mezger, W. Duschl, T. Herbst and R. Tuffs: The Nuclear Bulge. I K Band Observations of the Central 30 pc. *Astronomy and Astrophysics* 348, 768–782 (1999).
- Radovich, M., U. Klaas, D. Lemke and J. Acosta-Pulido: The 10-200 μm Spectral Energy Distribution of the Prototype Narrow-Line

- X-Ray Galaxy NGC 7582*. *Astronomy and Astrophysics* 348, 705–710 (1999).
- Rafanelli, P., V. Afanasiev, K. Birkle, P. Boehm, T. Boller, S. Dodonov, M. Radovich, G. Richter, M. Salvato and J. Vennik: MKN 298: an AGN hidden by Starbursts. *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 70, 81–84 (1999).
- Richards, P. J., L. B. G. Knee, S. C. Russell and M. Haas: FIR Mapping of Bok Globules CB202, CB220 and CB236 (L1166) with ISOPHOT. In: *Proceedings of the conference »The Universe as seen by ISO«*, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 513–516.
- Richichi, A., R. Köhler, J. Woitas and Ch. Leinert: Discovery of a Close Companion to the Young Star/Object Haro 6-37. *Astronomy and Astrophysics* 346, 501–504 (1999).
- Rix, H.-W.: The Past and the Future Fate of the Universe and the Formation of Structure in it. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 96, 8334–8335, 1999.
- Rix, H.-W., C. M. Carollo and K. Freeman: Large Stellar Disks in Small Elliptical Galaxies. *The Astrophysical Journal* 513, L25–L28 (1999).
- Robberto, M., S. V. W. Beckwith and T. Herbst: Circumstellar Disks in Orion: First Results from a Mid IR Survey. In: *Star Formation 1999, Proceedings of Star Formation*. (Ed.) T. Nakamoto. Nobeyama Radio Observatory, Nagoya 1999, 231–233.
- Robberto, M., M. R. Meyer, A. Natta and S. V. W. Beckwith: ISOPHOT Observations of Circumstellar Disks around Young Stellar Objects. *Proceedings of Conference »The Universe as seen by ISO«*, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 195–202.
- Roberts, E. R., J. R. Jeffries, D. E. Backman, D. Barrado y Navascués, K. E. Haisch and J. J. Dalton: Open Cluster Lower Main Sequences at 15 to 35 Myr. *Bulletin of the American Astronomical Society* 31, (1999) 1442.
- Roche, N., St. A. Eales, H. Hippelein and Ch. J. Willott: The Angular Correlation Function of K~19.5 Galaxies and the Detection of a Cluster at $z = 0.775$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 306, 538 (1999).
- Rohloff, R.-R., E. Pitz, T. Hawarden, N. Rees, E. Ard-Ettdgui, H. W. Kaufmann and L. D. Schmadel: Lightweight Secondary Mirror from the United Kingdom Infrared Telescope. In: *Advanced Telescope Design, Fabrication and Control*, (Ed.) William Roybal. *Proceedings of the SPIE* 3785, SPIE Bellingham 1999, 152–159.
- Röser, H.-J. and K. Meisenheimer (Eds.): *The Radio Galaxy Messier 87, Lecture Notes in Physics* 530. Springer, Heidelberg 1999, 342.
- Rowan-Robinson, M., S. Oliver, A. Efstathiou, C. Gruppioni, S. Serjeant, C. Cesarsky, L. Danese, A. Franceschini, R. Genzel, A. Lawrence, D. Lemke, R. McMahon, G. Miley, I. Perez-Fourmon, J. L. Puget, B. Rocca-Volmerange, P. Ciliegi, P. Héraudeau, C. Surace, F. La Franca and the ELAIS consortium: The European Large Area ISO Survey: ELAIS. In: *Proceedings of the conference »The Universe as seen by ISO«*, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 1011–1016.
- Runacres, M. C., R. Blomme, K. Vyverman, M. Cohen, C. Leitherer, S. P. Owocki and M. Haas: ISOPHOT Observations of Wolf-Rayet Winds. In: *Wolf-Rayet Phenomena in Massive Stars and Starburst Galaxies*. *Proceedings of the 193rd Symposium of the International Astronomical Union*, (Eds.) K. van der Hucht, G. Koenigsberger, Ph. Eenens. *Astronomical Society of the Pacific*, San Francisco 1999, 96.
- Sandquist, E. L., R. Taam and A. Burkert: Formation and Mechanisms for Helium White Dwarfs in Binaries. *American Astronomical Society Meeting* 194 (1999), 75.04.
- Schmid, H.M., J. Krautter, I. Appenzeller and H. Mandel: FUV ORFEUS Spectroscopy of the Slowly Evolving Symbiotic Nova RR Tel. In: *Unsolved Problems in Stellar Evolution: Poster Papers from the Space Telescope Science Institute Symposium*, (Ed.) M. Livio. Baltimore 1999, 77.
- Schmid, H. M., J. Krautter, I. Appenzeller, J. Barnstedt, T. Dumm, A. Fromm, M. Götz, M. Grewing, W. Gringel, C. Haas, W. Hopfensitz, N. Kappelman, G. Krämer, A. Lindenberger, H. Mandel, U. Mürset, H. Schild, W. Schmutz and H. Widmann: ORFEUS Spectroscopy of the O VI Lines in Symbiotic Stars and the Raman Scattering Process. *Astronomy and Astrophysics* 348, 950–971 (1999).
- Schmidtobreick, L., M. Haas and D. Lemke: About the Nature of the FIR Dust Knots in M 31. In: *Schieliëcke, R. E. (Ed.), Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999) 49.
- Scholz, R.-D., M. Irwin, A. Schweitzer and R. Ibata: APMPM JO237-5928: a New Nearby Active M 5 Dwarf Detected in a High Proper Motion Survey of the Southern Sky. *Astronomy and Astrophysics* 345, L55–L57 (1999).
- Scholz, R.-D., M. McCaughrean, H. Zinnecker, M. Irwin, A. Schweitzer, J. Stauffer and R. Ibata: Brown Dwarfs Among Newly Detected High-Proper Motion Stars? In: *Schielecke, R. E. (Ed.), Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), P15S.
- Schulz, B., S. Huth, U. Kinkel, D. Lemke, J.A. Acosta Pulido, M. Braun, H. O. Castañeda, L. Cornwall, C. Gabriel, I. Heinrichsen, U. Herbstmeier, U. Klaas, R. J. Laurejis and T. G. Müller. ISOPHOT – Photometric Calibration of Point Sources. In: *Proceedings of conference »The Universe as seen by ISO«*, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 89–94.
- Shelton, R. L., D. P. Cox, W. Maciejewski, R. K. Smith, T. Plewa, A. Pawl and M. Rózycka: Modelling W44 as a Supernova Remnant in a Density Gradient with a Partially Formed Dense Shell and Thermal Conduction in the Hot Interior. II. The Hydrodynamic Models. *The Astrophysical Journal* 524, 192–212 (1999)
- Slyz, A. and K. H. Prendergast: Time-Independent Gravitational Fields in the BGK Scheme for Hydrodynamics. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 139, 199–217 (1999).
- Song, I., J.-P. Caillaud, D. Barrado y Navascués and J. R. Stauffer: Ages of Vega-like Stars. *Bulletin of the American Astronomical Society Meeting* 31 (1999), 1409.
- Stauffer, J. R., D. Barrado y Navascués, J. Bouvier, H. L. Morrison, P. Harding, K. L. Luhman, T. Stanke, M. McCaughrean, D. M. Terndrup, L. Allen and P. Assouad: Keck Spectra of Brown Dwarf Candidates and a Precise Determination of the Lithium Depletion Boundary in the α Persei Open Cluster. *The Astrophysical Journal* 527, 219–229 (1999).
- Stecklum, B., M. Feldt, Th. Henning and W. Pfau: Infrared Observations of Young Massive Stars. In: *Wolf-Rayet Phenomena in Massive Stars and Starburst Galaxies*. *Proceedings of the 193rd Symposium of the International Astronomical Union*, (Eds.) K. van der Hucht, G. Koenigsberger, Ph. Eenens. *Astronomical Society of the Pacific*, San Francisco 1999, 497.
- Stickel, M., D. Lemke, L. V. Tóth, S. Hotzel, U. Klaas, S. Bogun, M. F. Kessler, R. Laurejis, M. Burgdorf, C. A. Beichman, M. Rowan-Robinson, A. Efstathiou, G. Richter and M. Braun: The ISO Serendipity Far-Infrared Sky Survey – a status report. In: *Proceedings of the conference »The Universe as seen by ISO«*, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 839–844.
- Surace, C., P. Héraudeau, D. Lemke, S. Oliver, M. Rowan-Robinson and the ELAIS consortium: The European Large-Area ISO Survey: ISOPHOT results using the MPIA pipeline. In: *Proceedings of the conference »The Universe as seen by ISO«*, Paris,

- (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 1059–1062.
- Temporin, S., P. Rafanelli, G. Richter, J. Vennik, S. Ciroi and K. Birkle: The Seyfert-2 Galaxy To1 1238-364 and its Companion ESO 381-G009: Long-Slit Spectroscopy and IRAS Data Analysis. *Memorie della Società Astronomica Italiana* 70, 87–88 (1999).
- Thompson, D., S.V.W. Beckwith, R. Fockenbrock, J. Fried, H. Hippelein, J.-S. Huang, B. von Kuhlmann, Ch. Leinert, K. Meisenheimer, S. Phleps, H.-J. Röser, E. Thommes and Chr. Wolf: The Surface Density of Extremely Red Objects. *The Astrophysical Journal* 523, 100–106 (1999).
- Tóth, L. V., D. Lemke, O. Krause, S. Hotzel, M. Stickel, U. Klaas, S. Bogun, M. F. Kessler, R. J. Laurejis, M. Burgdorf, C. A. Beichman, M. Rowan-Robinson, A. Efstathiou, G. Richter and M. Braun: Interstellar Clouds as seen in the ISO Serendipity Survey. In: Proceedings of the conference »The Universe as seen by ISO«, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 771–774.
- Travaglio, C., D. Galli, R. Gallino, M. Busso, F. Ferrini and O. Straniero: Galactic Chemical Evolution of Heavy Elements: From Barium to Europium. *The Astrophysical Journal* 521, 691–702 (1999).
- Travaglio, C., R. Gallino, S. Amari, E. Zinner, S. Woosle and R. S. Lewis: Low-Density Graphite Grains and Mixing in Type II Supernovae. *The Astrophysical Journal* 510, 325–354 (1999).
- Vives, T.: Cuando empieza el tercer milenio? *Tribuna de Astronomía y Universo* No. 5, 22–28 (1999).
- Walker, H. J., I. Heinrichsen, U. Klaas and R. J. Sylvester: Infrared Mapping of the Dust around Main Sequence Stars. In: Proceedings of Conference »The Universe as seen by ISO«, Paris, (Eds.) P. Cox, M. F. Kessel. ESA-SP-427, ESA Publ. Div., Noordwijk 1999, 425–428.
- Wilke, K.: Mass Distribution and Kinematics of the Barred Galaxies NGC 3992 and NGC 7479. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999) 38.
- Wilke, K., C. Möllenhoff and M. Matthias: Mass Distribution and Kinematics of the Barred Galaxy NGC 2336. *Astronomy and Astrophysics* 344, 787–806 (1999).
- Wolf, Chr.: Multicolor Classification in CADIS and the Search for Quasars. *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 111, 1048 (1999).
- Wolf, Chr., K. Meisenheimer, H.-J. Röser, S. V. W. Beckwith, R. Fockenbrock, H. Hippelein, B. von Kuhlmann, S. Phleps and E. Thommes: Did Most High-Redshift Quasars Escape Detection? *Astronomy and Astrophysics* 343, 399–406 (1999).
- Yahagi, H., M. Mori and Y. Yoshii: The Forest Method as a New Parallel Tree Method with the Sectional Voronoi Tessellation. *The Astrophysical Journal Supplement* 124, 1–9 (1999).
- Yoshikoshi, T., S. A. Dazeley, S. Gunji, S. Hara, T. Hara, J. Holder, J. Jimbo, A. Kawachi, T. Kifune, H. Kubo, J. Kushida, S. Le Bohec, Y. Matsubara, Y. Mizumoto, M. Mori, M. Moriya, H. Muraishi, Y. Muraki, T. Naito, K. Nishijima, J. R. Patterson, M. D. Roberts, G. P. Rowell, K. Sakurazawa, R. Susukita, T. Tamura, T. Tanimori, S. Yanagita, T. Yoshida and A. Yuki: Present Status of the 7-10 m Telescope CANGAROO II. *Astroparticle Physics* 11, 267–269 (1999).
- Zickgraf, F.-J., J. M. Alcalá, J. Krautter, M. F. Sterzik, I. Appenzeller, S. Frink and E. Covino: The Late-Type Stellar Component in the ROSAT All-Sky Survey at High Galactic Latitude. In: Schielicke, R. E. (Ed.), *Astronomische Gesellschaft Abstract Series* 15 (1999), L02Z.

Diplomarbeiten

- Wackermann, R.: Test und Inbetriebnahme der Weitfeldkamera am 2.2-m-MPG/ESO-Teleskop. Heidelberg 1999

Dissertationen

- Eckardt, St.: Wirkung kosmischer Strahlung auf Infrarot-Detektoren in Astronomie-Satelliten und Charakterisierung einer Kamera für den Satelliten FIRST. Heidelberg 1999.
- Kessel-Deynet, O.: Berücksichtigung ionisierender Strahlung im Smoothed-Particle-Hydrodynamics-Verfahren und Anwendung auf die Dynamik von Wolkenkernen im Strahlungsfeld massive Sterne. Universität Heidelberg 1999.
- Wolf, Chr.: Vielfarben-Klassifikation in CADIS und die Suche nach Quasaren. Heidelberg 1999.
- Woitats, J.: Eigenschaften der Komponenten in jungen Dopplersystemen. Heidelberg 1999.



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 anwendungsoffene 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