

INAUGURAL-DISSERTATION
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Naturwissenschaftlich-Mathematischen
Gesamtfakultät
der
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

vorgelegt von

Diplom-Physiker Oliver Krause
aus Laupheim

Tag der mündlichen Prüfung: 15.10.2003

Die Natur kalter Quellen der 170 μm ISOPHOT Zufallsdurchmusterung

Gutachter: Prof. Dr. Dietrich Lemke
Prof. Dr. Immo Appenzeller

Zusammenfassung

Mit Hilfe des europäischen Infrarot-Weltraumobservatoriums ISO konnte erstmalig eine Himmelsdurchmusterung hoher räumlicher Auflösung im bisher unerforschten fernen Infrarotbereich zwischen 120 und 240 μm durchgeführt werden. In der vorliegenden Doktorarbeit wurde dieser einzigartige Datensatz der ISOPHOT Zufallsdurchmusterung (ISOSS) für die systematische Suche nach galaktischen und extragalaktischen Himmelsobjekten verwendet, die mit Staubtemperaturen unter 20 K so kalt sind, daß sie mit bisherigen Verfahren nicht identifiziert werden konnten. Zur detaillierten Untersuchung dieser Objekte wurden umfangreiche bodengebundene Nachfolgebeobachtungen vom Optischen bis in den Radiobereich durchgeführt. Hohe Massen ($M \sim 10^{3\pm 1} M_{\odot}$) und niedrige Staubtemperaturen ($T \sim 12-18$ K) machen 35 kompakte galaktische Molekülwolken zu ausgezeichneten Kandidaten massereicher Sternentstehungsgebiete in einem frühen Entwicklungszustand. In dem neuentdeckten Sternentstehungsgebiet ISOSS J 20298+3559 wurde die Koexistenz unterschiedlicher Entwicklungsphasen von gravitativ gebundenen, prästellaren Wolkenkernen bis zu einem Herbig B2-Stern mit Akkretions-scheibe belegt. Submillimeter Nachfolgebeobachtungen von 40 kalten, leuchtkräftigen ISOSS-Galaxien zeigen, daß große Mengen an 20 K kaltem Staub in deren Sternentstehungsgebieten bisher unentdeckt geblieben sind. Ein außergewöhnliches Objekt der Durchmusterung ist die gas- und staubreiche elliptische Riesengalaxie ISOSS J 15079+7247. Trotz des Fehlens jeglicher Anzeichen von Aktivität im Optischen konnte sie als Gegenstück einer ultraleuchtkräftigen Infrarot-Galaxie identifiziert werden. Das hat wichtige Implikationen für die Deutung der Klasse der Submillimeter-Galaxien, wie anhand der hellsten Submm-Quelle im Hubble Deep Field, HDF850.1, demonstriert wird.

Abstract

The European Infrared Space Observatory ISO performed for the first time a sky survey with high spatial resolution in the previously unexplored far infrared wavelength range between 120 and 240 μm . The unique data base of the ISOPHOT Serendipity Survey (ISOSS) was searched for galactic and extragalactic sources with dust temperatures below 20 K, which previous methods failed to identify. Extensive groundbased follow-up campaigns from optical to radio wavelengths were performed for detailed studies of the newly discovered objects. 35 compact galactic molecular clouds are good candidates for massive star forming regions in an early evolutionary stage due to their high masses ($M \sim 10^{3\pm 1} M_{\odot}$) and low dust temperatures ($T \sim 12-18$ K). A detailed study of the newly discovered object ISOSS J 20298+3559 reveals the coexistence of different stages of stellar evolution from gravitationally bound prestellar cloud cores to a Herbig B2 star with an accretion disc. Submillimeter follow-up observations of 40 cold and luminous ISOSS galaxies proved that large amounts of 20 K dust were previously not detected. A remarkable object of the survey is the gas and dust rich giant elliptical galaxy ISOSS J 15079+7247. Despite the non-detection of any optical signatures of activity, the elliptical could be identified as the counterpart of an ultraluminous infrared galaxy. This has important implications for the nature of submillimeter galaxies as demonstrated for the brightest submillimeter-source in the Hubble Deep Field, HDF 850.1.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
1.1	Infrarot-Astronomie	4
1.2	IR-Weltraumteleskope	6
1.3	Das Photopolarimeter ISOPHOT	7
1.4	Die ISOPHOT Zufallsdurchmusterung (ISOSS)	8
1.5	Die wissenschaftliche Bedeutung kalter ISOSS-Quellen	9
1.6	Aufbau der Doktorarbeit	10
2	Datenbasis und Himmelsatlas der Zufallsdurchmusterung	12
2.1	Durchführung der ISOSS-Beobachtungen	12
2.2	Prozessierung der ISOSS-Daten	14
2.3	Quellenextraktion	15
2.4	Kalibrationsstrategie des ISOSS	16
2.5	Die Methode der selbstkonsistenten Kreuzkalibration	17
2.6	Kalibrationsgenauigkeit	21
2.7	Karten aus der Zufallsdurchmusterung	22
2.8	Der ISOSS 170 μm Himmelsatlas	23
3	Entstehungsgebiete massereicher Sterne	25
3.1	Einleitung	25
3.2	Die Suche nach massereichen Protosternen	27
3.3	Kreuzkorrelation mit Moleküllinien-Durchmusterungen	28
3.4	Eigenschaften der Sternentstehungsgebiete	30
3.4.1	Entfernungen und galaktische Verteilung	30
3.4.2	Leuchtkräfte	32
3.4.3	Flußverhältnisse und Farbtemperaturen	32
3.4.4	Staubmassen aus den Ferninfrarot-Messungen	34

3.5	(Sub)millimeter-Beobachtungen des Staubes	36
3.5.1	Morphologie der Staubemission	37
3.6	Ammoniak-Beobachtungen des dichten Gases	40
3.6.1	Detektionsstatistik	41
3.6.2	Morphologie der dichten Molekülwolken	45
3.6.3	Kinetische Temperatur des molekularen Gases	45
3.7	Zusammenfassung	45
4	Fallstudie I: Das junge Sternentstehungsgebiet ISOSS 20298+3559	47
4.1	Einleitung	47
4.2	Beobachtungen	48
4.2.1	Submillimeter-Beobachtungen mit SCUBA & MAMBO	48
4.2.2	Direktaufnahmen im mittleren Infrarot mit UKIRT/MAX	48
4.2.3	Optische Spektroskopie und Photometrie	48
4.2.4	Ammoniak-Messungen mit dem Effelsberg 100m-Teleskop	49
4.3	Ergebnisse	49
4.3.1	Morphologie der kalten ISOSS Quelle	49
4.3.2	Entfernung und großflächige Struktur	51
4.3.3	Masse des Dunkelwolkenkomplexes	54
4.3.4	Eigenschaften der Staubkomponente in der Quelle FIR1	55
4.3.5	Dichtes Gas im kalten Wolkenkern	57
4.3.6	Junge stellare Objekte im Wolkenkomplex	60
4.3.7	Untersuchung des Herbig B2-Sterns IRS1	62
4.4	Diskussion	65
4.4.1	Hinweise auf einen prä-protostellaren Kern	65
4.4.2	Die Natur der Submillimeter-Quellen SMM1 und SMM3	66
4.4.3	Hinweise auf Akkretion auf den sehr jungen Herbig B2-Stern IRS1	68
4.4.4	Effizienz der Sternentstehung	71
4.5	Zusammenfassung	72
5	Kalter Staub in leuchtkräftigen Galaxien	73
5.1	Einleitung	73
5.2	Auswahlkriterien der ISOSS-Stichprobe	75
5.3	Beobachtungen	77
5.3.1	SCUBA Submillimeter-Kontinuums Beobachtungen	77

5.3.2	MAMBO 1.2 mm-Messungen	77
5.3.3	ISOPHOT Daten	78
5.3.4	HI-Messungen und optische Direktaufnahmen	79
5.3.5	JHK (2MASS) und 21 cm-Kontinuum (VLA) Daten	79
5.4	Ergebnisse	79
5.4.1	Morphologie der Staubemission	81
5.4.2	Spektrale Energieverteilungen	83
5.4.3	Leuchtkräfte	85
5.4.4	Staub- und Gasmassen	87
5.4.5	Optische Eigenschaften	88
5.5	Diskussion	88
5.5.1	Über die Existenz sehr kalten Staubes	88
5.5.2	Ferninfrarot-zu-Radio Korrelation	89
5.5.3	Implikationen für die Identifikation von Submillimeter-Galaxien	92
5.6	Zusammenfassung	93
6	Fallstudie II: Die gas- und staubreiche elliptische Galaxie ISOSS 15079+7247	97
6.1	Einleitung	97
6.2	Beobachtungen	98
6.3	Ergebnisse	99
6.4	Diskussion	103
6.4.1	Molekulares Gas	104
6.4.2	Hohe Staubmasse	104
6.4.3	Gas-zu-Staub-Massenverhältnis	104
6.4.4	Hohe Sternentstehungsrate	104
6.4.5	Hinweise auf einen verborgenen Sternentstehungsausbruch	105
6.4.6	Die Rolle der Begleitgalaxie	106
6.5	Neue Deutung der Submillimeter-Galaxie HDF850.1	106
6.6	Zusammenfassung	110
7	Ausblick	111

Kapitel 1

Einführung

Diese Arbeit behandelt ein Thema aus dem aktuellen Forschungsgebiet der Infrarot-Astronomie. Mit Hilfe des europäischen Weltraumobservatoriums ISO konnten 15 % des Himmels im fernen Infrarotbereich bei einer Wellenlänge bis $240 \mu\text{m}$ mit hoher räumlicher Auflösung kartiert werden. Mit der Datenbasis dieser ISOPHOT-Zufallsdurchmusterung (ISOSS) wurde eine systematische Suche nach kalten galaktischen Sternentstehungsgebieten und massereichen Galaxien durchgeführt. Große Mengen von kaltem Staub in diesen Objekten machen das neue ISOSS $170 \mu\text{m}$ Band bestens zu deren Erforschung geeignet. Bodengebundene Nachfolgebeobachtungen vom Optischen bis in den Radiobereich erlauben eine detaillierte Untersuchung der physikalischen Natur dieser Quellen.

1.1 Infrarot-Astronomie

Große Teile der Milchstraße und anderer Galaxien sind hinter dichten Wolken aus Gas und Staub verborgen. Obwohl Staub weniger als 1% der Gesamtmasse interstellarer Materie ausmacht, verhindert er durch Absorption sichtbaren Lichts den direkten Einblick in solche Regionen. Die typische Größe kosmischer Staubteilchen beträgt weniger als $0.1 \mu\text{m}$. Das entspricht der Wellenlänge kurzwelligeren Lichts und hat große Wirkungsquerschnitte für Streuung und Absorption an Staub zur Folge. Da die Staubextinktion mit zunehmender Wellenlänge stark abnimmt (Rieke & Lebofsky 1985), eröffnet die Beobachtung der langwelligeren Wärmestrahlung den Blick in kalte ($T \sim 10 \dots 100\text{K}$) Gebiete. Darüberhinaus erwärmt sich Staub durch Absorption kurzwelligerer Strahlung und gibt die aufgenommene Energie bei größeren Wellenlängen mit der charakteristischen Strahlungsleistung eines Grauen Körpers wieder ab. Trotz seiner geringen Menge reguliert Staub so den elektromagnetischen Strahlungshaushalt im interstellaren Medium. Je nach Art des Heizprozesses und Natur des Staubs treten Temperaturen zwischen mehr als 1000K in der Nähe junger Sterne (Appenzeller & Mundt 1989) und unter 10K in dichten, prästellaren Kernen von Dunkelwolken auf (Juvela et al. 2002). Nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz entspricht dies spektralen Energieverteilungen, deren Maxima im Infraroten (IR) mit Wellenlängen zwischen $3 \mu\text{m}$ und $300 \mu\text{m}$ liegen.¹

Eine besonders wichtige Rolle spielen Infrarotbeobachtungen bei der Erforschung der Stern-

¹Unterteilt in nahes (NIR $0.8\text{--}3 \mu\text{m}$), mittleres (MIR $3\text{--}30 \mu\text{m}$) und fernes (FIR $30\text{--}300 \mu\text{m}$) Infrarot. Zum Langwelligeren hin schließt sich der Submillimeterbereich ($300\text{--}1000 \mu\text{m}$) an.

und Planetenentstehung. Die ersten Phasen der Sternentstehung ereignen sich tief im Inneren von dichten Staubwolken (Lada & Adams 1992). Neue Sterne entstehen durch Gravitationskollaps dichter Kerne in diesen Wolken. Diese protostellaren Verdichtungen sind anfänglich so kalt, daß deren Wärmestrahlung ausschließlich im fernen Infrarot nachgewiesen werden kann (Ward-Thompson 2002). Während ihrer frühen Entwicklung sind sonnenähnliche Sterne von protoplanetaren Scheiben umgeben. Die thermische Emission warmen Staubes in diesen Scheiben macht sie zu auffälligen Objekten im nahen und mittleren Infrarot. Im Falle massereicher Sternentstehung führen heiße O- und B-Sterne durch ihre intensive UV-Strahlung zur Ionisation des Gases sowie zur Heizung des Staubs der umgebenden Molekülwolke und machen diese Objekte zu den leuchtkräftigsten galaktischen Infrarotquellen (Wood & Churchwell 1989, Henning et al. 2000). Neben der kontinuierlichen thermischen Strahlung des Staubs tritt im Infraroten auch charakteristische Linienstrahlung von molekularen Vibrationsübergängen und Rotationsübergängen auf. Wichtige diagnostische Linien, z.B. von molekularem Wasserstoff und Kohlenmonoxid bei $2\ \mu\text{m}$, Übergänge von Silikat und polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAHs) im mittleren Infrarot bis zu Emissionslinien im fernen Infrarot, wie der wichtigen Kühllinie von [CII] bei $158\ \mu\text{m}$, erlauben dabei eine genaue Analyse des physikalischen Zustandes des zirkum- und interstellaren Mediums.

Auch für die extragalaktische und kosmologische Forschung spielen Beobachtungen im fernen Infrarot eine entscheidende Rolle. Schon normale Galaxien wie unsere Milchstraße strahlen im FIR eine den anderen Wellenlängenbereichen vergleichbare Energiemenge ab. Dies ändert sich dramatisch, wenn sich die Objekte in Phasen erhöhter Aktivität infolge Sternentstehung befinden. Die Infrarotleuchtkraft kann dabei die Emission in den anderen Wellenlängenbereichen um ein Vielfaches übertreffen (Sanders & Mirabel 1996). Im frühen Universum war die Sternentstehungsrate und Wechselwirkung von Galaxien untereinander viel höher als heute (Rowan-Robinson et al. 1997). Messungen im FIR ermöglichen die Beobachtung solcher Quellen, deren Strahlung uns stark rotverschoben erreicht. Viele Quellen sind deshalb ausschließlich im Submillimeter-Bereich zu detektieren. Dort befinden sich auch wichtige diagnostische Spektrallinien, die Aussagen über die Natur von Infrarotgalaxien zulassen. Über die Linienverhältnisse ionisierter Atome im MIR können z.B. Anregungstemperaturen in nahen Galaxien bestimmt und Sternentstehungsausbrüche von aktiven Galaxienkernen mit ihren zentralen Schwarzen Löchern unterschieden werden (Genzel et al. 1998).

Trotz seiner Wichtigkeit für weite Bereiche der Astrophysik macht die rund 300 K warme Erdatmosphäre astronomische Beobachtungen in weiten Bereichen des Infraroten aufgrund von Absorption an molekularen Luftbestandteilen wie H_2O und CO_2 , sowie aufgrund des durch sie verursachten thermischen Vordergrundes unmöglich. Wie Abb. 1.1 zeigt, können Messungen in einzelnen Bändern des NIR und MIR allenfalls von hohen Bergen mit trockenem Klima (z.B. Mauna Kea, Hawaii) aus durchgeführt werden. Das FIR ist vom Boden aus gänzlich unbeobachtbar und erst im Submillimeter-Bereich öffnen sich wieder einige Spektralbänder geringer Transmission.

Um den Einfluß der Atmosphäre zu reduzieren, werden seit den 60er Jahren von der Stratosphäre aus Beobachtungen unter Einsatz von Flugzeug- (Kuiper Airborne Observatory, Cameron 1976) und Ballontelestopen (THISBE, Lemke 1976) durchgeführt. Mit SOFIA (Becklin 2000) soll ab dem Jahr 2005 wieder ein leistungsfähiges Flugzeugobservatorium verfügbar sein.

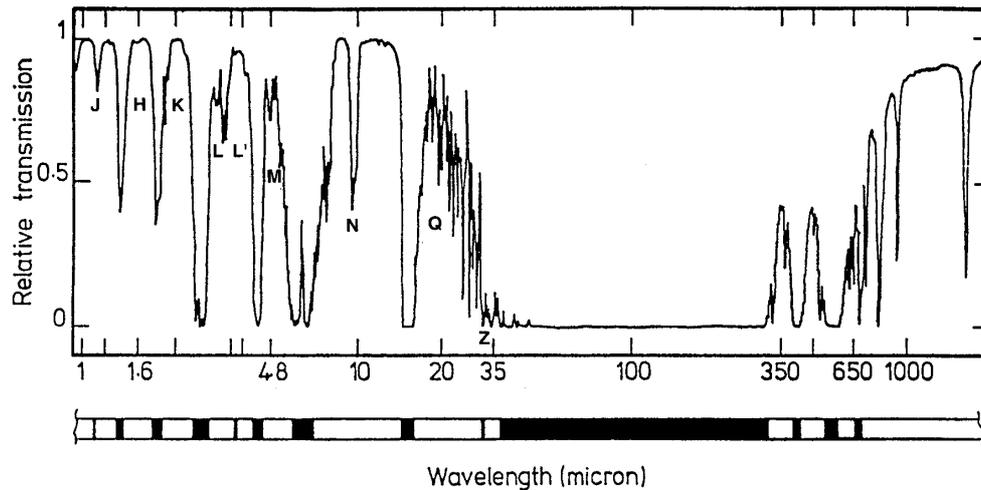


Abbildung 1.1: Atmosphärische Transmission auf dem Mauna Kea (4100 m über NN) in Hawaii. Die Werte gelten für einen Restwasserdampfgehalt von 1 mm und sind damit nur an wenigen Orten der Erde, und dort auch nur zeitweise, erreichbar. Während viele Bereiche einschließlich des fernen Infrarot (30–300 μm) vom Erdboden gänzlich unzugänglich sind (dunkle Bänder im Balken unter dem Diagramm), existieren sowohl bei kürzeren als auch längeren Wellenlängen einzelne Bereiche guter Transmission. Diese Bänder sind mit ihren astronomischen Bezeichnungen angegeben. In nahezu allen Bändern wurden im Rahmen dieser Doktorarbeit Nachfolgebeobachtungen durchgeführt (Abbildung nach Smyth 1986).

1.2 IR-Weltraumteleskope

Wirklich empfindliche Beobachtungen im fernen Infrarot sind jedoch ausschließlich gekühlten Weltraumteleskopen vorbehalten. IRAS (InfraRed Astronomical Satellite, Neugebauer et al. 1984) konnte im Jahre 1983 zum ersten Mal außerhalb der durch Emission und Absorption störenden Erdatmosphäre beinahe den gesamten Himmel in vier Bändern des mittleren und fernen Infrarot (12, 25, 60 und 100 μm) mit bis dahin unerreichter Empfindlichkeit kartieren. Der aus diesen Beobachtungen abgeleitete Punktquellenkatalog (Beichman et al. 1988) enthält 245889 Objekte und stellt bis heute eine wichtige Referenz der Infrarot-Astronomie dar. Im Rahmen der COBE/DIRBE-Mission (Boggess et al. 1992) wurde der Gesamthimmel in 10 Bändern mit einer Winkelauflösung von 0.7° vermessen und die ausgedehnte kalte Staubemission in unserer Milchstraße charakterisiert (Sodroski et al. 1997). Das erste Weltraumobservatorium für den gesamten Infrarot-Bereich von 2.5–240 μm stellte die europäische ISO-Mission zur Verfügung (siehe Abschnitt 1.3).

Die Wichtigkeit des infraroten Spektralbereiches spiegelt sich auch in einer Vielzahl künftiger Satellitenmissionen wieder. Noch für das Jahre 2003 ist der Start des amerikanischen IR-Weltraumobservatoriums SIRTf (Space Infrared Telescope Facility) vorgesehen. SIRTf ist wie sein Vorgänger ISO für pointierte Beobachtungen von Einzelobjekten ausgelegt und dafür mit 3 wissenschaftlichen Instrumenten ausgerüstet. Im Jahre 2004 ist der Start des japanischen Infrarot-Satelliten ASTRO-F vorgesehen, der wie IRAS eine vollständige Himmeldurchmusterung in mehreren Bändern durchführen wird. All diese Satellitenteleskope sind mit verhältnismäßig kleinen Hauptspiegeln ausgerüstet und für Wellenlängen größer 60 μm in ihrer Nachweisempfindlichkeit vom Konfusionsrauschen des interstellaren Zirkus begrenzt (Helou & Beichman 1990). Ab dem Jahre 2007 wird es mit dem europäischen Weltraumteleskop HERSCHEL,

das mit einem 3.5m-Spiegel ausgestattet sein wird, erstmals möglich sein, diese fundamentale Nachweisgrenze zu durchbrechen und aufgrund einer 6 mal größeren Winkelauflösung als ISO im FIR schwache Punktquellen im mJy Bereich nachzuweisen. Dies wird die Beobachtung einzelner sternbildender Galaxien bei Rotverschiebungen von $z \sim 5-10$ erlauben.

Noch weiter in die Geschichte des Kosmos zurückblicken soll ab dem Jahre 2011 dann das James-Webb-Space-Telescope (vormals Next Generation Space Telescope). Mit drei Instrumenten für das nahe und mittlere Infrarot ausgerüstet wird das JWST im nittleren Infrarot eine Nachweisempfindlichkeit von einigen nJy besitzen und im Stande sein, Galaxien bis hinaus zu einer Rotverschiebung von $z \sim 15$ zu detektieren und damit die früheste Epoche der Galaxienentstehung und -entwicklung zu analysieren.

1.3 Das Photopolarimeter ISOPHOT

Das europäische IR-Satellitenobservatorium ISO (Infrared Space Observatory, Kessler et al. 1996) führte von 1995–1998 im Wellenlängenbereich 2.5–240 μm astronomische Beobachtungen mit hoher Empfindlichkeit und großer räumlicher und spektraler Auflösung durch. Im Gegensatz zu den früheren IR-Missionen IRAS und COBE/DIRBE, die Durchmusterungen des gesamten Himmels durchführten, waren mit ISO als dreiaachsenstabilisiertem Weltraumobservatorium vor allem Detailbeobachtungen von einzelnen Objekten möglich. Die Optik bestand aus einem auf 3 K gekühltem Ritchey-Chrétien-System mit 60 cm Spiegel (f/15), das zusammen mit den Instrumenten der Fokalebene in einen Kryostaten eingebaut war. Dieser machte den Großteil des Satellitenvolumens aus. Die Kühlung der Detektoren bis zu einer Temperatur von 1.8 K erfolgte mit Hilfe von anfangs 2300 l superflüssigem Helium. Aufgrund der hervorragenden thermischen Eigenschaften des ISO-Satelliten konnte eine Missionsdauer von 29 Monaten erreicht werden, 11 Monate länger als ursprünglich geplant. Abb. 1.2 zeigt einen Überblick des gesamten Satelliten. Die wissenschaftliche Nutzlast bestand aus 4 Instrumenten.

Eines der vielseitigsten der vier Instrumente an Bord von ISO war das abbildende Photopolarimeter ISOPHOT (Lemke et al. 1996). Es wurde unter Federführung des Max-Planck-Instituts

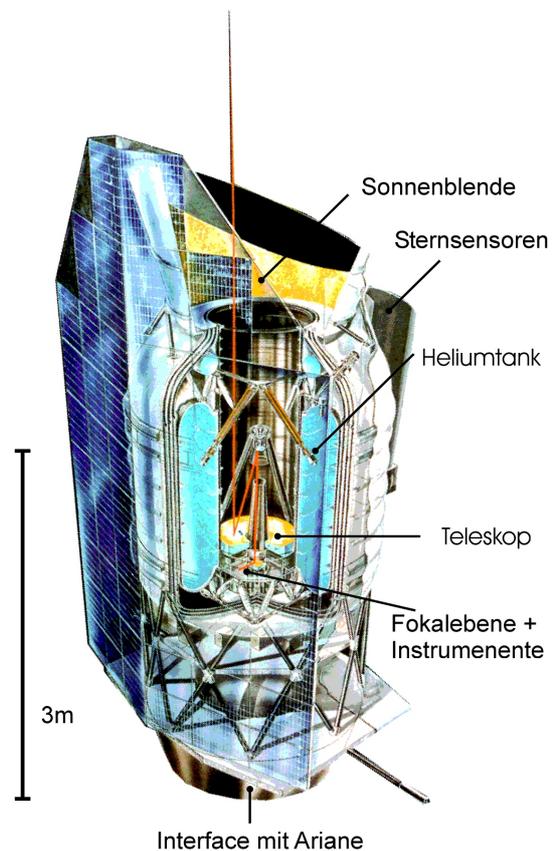


Abbildung 1.2: Schnittbild des Infrarot-Weltraumobservatoriums ISO. Der Satellit besteht zum großen Teil aus einem Heliumkryostaten, der neben den Instrumenten der Fokalebene auch das gesamte Teleskop mit seinem 0.6 m-Hauptspiegel aufnahm. Dadurch waren empfindlichste Messungen im fernen Infraroten möglich.

für Astronomie, Heidelberg, entwickelt (PI D. Lemke), die Flugmodelle wurden von einem Industriekonsortium gebaut. Das Instrument ermöglichte Spektrophotometrie, Polarimetrie und abbildende Photometrie. Insgesamt 144 photoleitende Detektoren in 7 Detektoreinheiten erschlossen den größten Wellenlängenbereich auf ISO (2.5 - 240 μm). Eine besondere technische Herausforderung stellte der erstmalige Einsatz gedrückter Ge:Ga-Kristalle unter den Bedingungen einer Satellitenmission dar. Insgesamt vier solcher Kristalle wurden als Bildelemente in der C200-Kamera eingesetzt, dem langwelligsten Strahlungsempfänger auf ISO (Abb. 1.3). Durch spezielle Schrauben wurden die Kristalle unter hohen mechanischen Druck gesetzt, womit die obere Grenzwellenlänge auf 240 μm ausgedehnt werden konnte. Um solche hochohmigen ($\sim 10^{13}$ Ohm) Detektoren rauscharm auslesen zu können, mußten neuartige Schaltkreise entwickelt werden, die dicht am Sensor bei einer Temperatur von 2 K und mit einer elektrischen Leistung im μW -Bereich betrieben werden konnten.

Um eine Vielzahl unterschiedlicher Beobachtungsmodi zu ermöglichen, war ISOPHOT mit Wechselrädern ausgestattet, die es erlaubten, Filter und Blenden in den Strahlengang zu fahren. Die Entwicklung dieser Komponenten, die mit minimalem Energiebedarf im Kryovakuum verlässlich funktionieren mußten, stellte hohe Anforderungen an die Instrumentenbauer (Lemke et al. 1993).

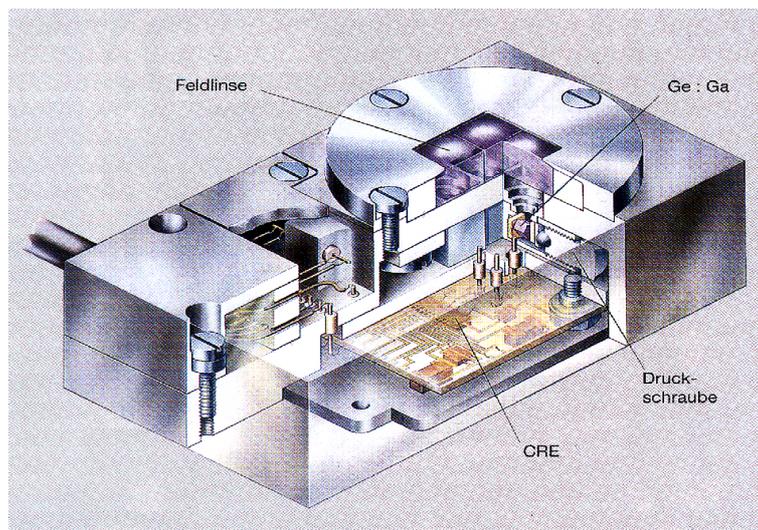


Abbildung 1.3: Aufbau der C200 Kamera von ISOPHOT. Zu erkennen sind die Germanium-Feldlinsen der 4 Detektoren aus mit Gallium dotierten Germanium. Durch Schrauben wurden diese unter hohen mechanischen Druck gesetzt. Dies ermöglichte eine Absenkung des Leitungsbandabstandes und damit eine Grenzwellenlänge von 240 μm . Es war der erste Einsatz solcher Detektoren im Rahmen eines Satellitenexperimentes im Kryovakuum. Die Abmessungen der Einheit betragen $45.0 \times 25.0 \times 15.3 \text{ mm}^3$. Unmittelbar unter den Detektoren ist die bei einer Temperatur von 1.8 K betriebene Ausleseschaltung (CRE = Cold Readout Electronics) zu erkennen. (Abbildung Batelle, Frankfurt)

1.4 Die ISOPHOT Zufallsdurchmusterung (ISOSS)

Obwohl ISO für pointierte Messungen ausgewählter Himmelsobjekte konzipiert war, konnte mit dem ISO-Satelliten zusätzlich eine außergewöhnliche Himmelsdurchmusterung durchgeführt werden. So wurde während der Schwenkphasen von einem Beobachtungsobjekt zum nächsten

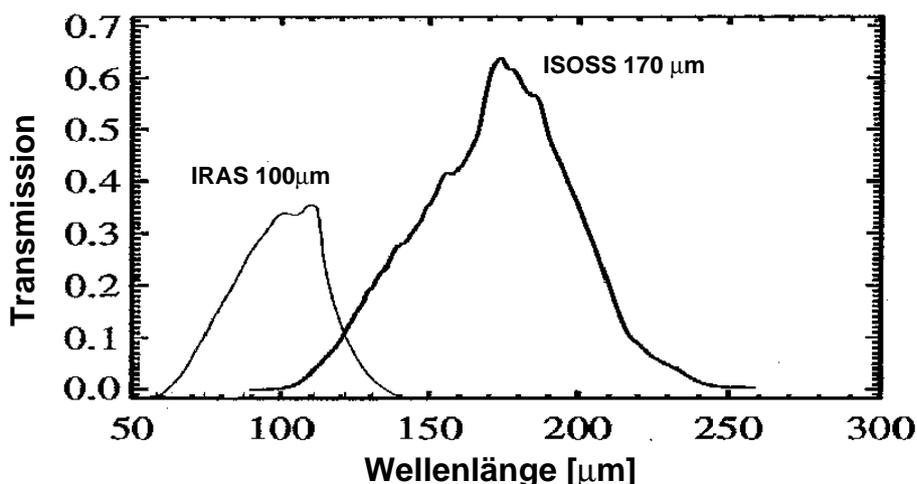


Abbildung 1.4: Transmission des in der Zufallsdurchmusterung eingesetzten 170 μm Filters. Die Zentralwellenlänge entspricht dem Strahlungsmaximum kalten Staubs einer Temperatur von 17 K. Staub dieses Temperaturbereichs dominiert die Energieabstrahlung einer Reihe wichtiger astronomischer Objekte und konnte mit bisherigen Satellitenmissionen nicht ausreichend vermessen werden, wie der Vergleich mit dem langwelligsten Band der IRAS-Mission bei 100 μm zeigt. Das ISOPHOT-Filter wurde von E. Kreysa & P. Gemünd am MPI für Radioastronomie gefertigt und am MPI für Kernphysik von W. Krätschmer kalt spektral vermessen.

die langwellige C200-Kamera von ISOPHOT eingeschaltet. Im Rahmen dieser ISOPHOT Zufallsdurchmusterung ISOSS (ISOPHOT Serendipity Survey) konnten während insgesamt 550 h Beobachtungszeit ungefähr 15% des Himmels kartiert werden. Während des Schwenks fuhr das Teleskop am Himmel Spuren ab, die Mindestabstände zu den stärksten Wärmequellen des Himmels (Sonne, Erde, Mond) einhalten mußten. Da solche Bahnen nicht genau vorhergesagt werden können (“Zufall”), führten Schwenk-Zeiten üblicherweise zum unvermeidbaren Zeitverlust bei Satelliten-Missionen. Bei ISO hingegen gelang es erstmalig, die Schwenk-Zeit wissenschaftlich zu nutzen.

Mit 170 μm Zentralwellenlänge des verwendeten Breitbandfilters (Abb. 1.4) stellt ISOSS die gegenwärtig flächengrößte Himmelsdurchmusterung mit hoher räumlicher Auflösung im fernen Infrarot jenseits des IRAS 100 μm -Bandes dar. Trotz der deutlich größeren Wellenlänge wurde mit 1.5' (FWHM) eine der IRAS-Mission bei 100 μm vergleichbare räumliche Auflösung (Cao et al. 1997) und Nachweisempfindlichkeit von 1 Jy für Punktquellen erreicht. Dies erlaubt die Identifizierung einer großen Zahl kompakter galaktischer und extragalaktischer FIR-Quellen, die dem COBE/DIRBE-Experiment aufgrund dessen grober räumlicher Auflösung von 0.7° verborgen blieben.

1.5 Die wissenschaftliche Bedeutung kalter ISOSS-Quellen

Himmelsdurchmusterungen haben in der Geschichte der Astrophysik oftmals zu bedeutenden Entdeckungen geführt. Dies war insbesondere dann der Fall, wenn erstmalig ein neuer Spektralbereich erschlossen werden konnte. Das neue 170 μm -Band der Zufallsdurchmusterung

nung ermöglicht es zum ersten Mal, kalten Staub mit einer Temperatur unter 20 K in einer großen Zahl von galaktischen und extragalaktischen Quellen nachzuweisen und zu charakterisieren. Dies stellt eine wesentliche Erweiterung des Temperaturbereichs gegenüber der IRAS Gesamthimmelsdurchmusterung dar, deren homogener Datensatz oftmals verwendet wurde, um Stichproben für statistische Untersuchungen von Objektklassen im Infraroten abzuleiten. Zu den bedeutendsten Entdeckungen der IRAS-Durchmusterung gehören die Klasse der ultra- und hyperleuchtkräftigen Infrarot Galaxien (Rowan-Robinson et al. 1991, Sanders & Mirabel 1996) sowie junge, noch tief in Staubscheiben eingebettete Sterne (sogenannte Objekte der Klasse I, Lada & Adams 1992). Die aktive Sternentstehung führt bei solchen Objekten zur Erwärmung des Staubes auf $T \sim 30..100$ K und machte IRAS hervorragend geeignet, sie bei $60 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$ zu detektieren.

Durch Ferninfrarot-Beobachtungen unserer Milchstraße (Sodroski et al. 1997) mit COBE und ausgewählter Galaxien, wie etwa des Andromedanebels (Haas et al. 1998) mit ISO, weiß man, daß eine kalte Staubkomponente den Großteil der Staubmasse in Spiralgalaxien ausmachen kann. Staub ist fein verteilt dem deutlich massereicheren Gas beigemischt. Die optisch dünne Emission des Staubes im fernen Infrarot ist hervorragend geeignet, den Zustand des interstellaren Mediums zu charakterisieren. Für die Konversion von Staub- zu Gasmasse ist insbesondere die Kenntnis von deren Massenverhältnissen von großem Interesse. Untersuchungen der Staubemission an einer Galaxienauswahl der Zufallsdurchmusterung haben es ermöglicht, zum ersten Mal verlässliche Gas-zu-Staub-Verhältnisse und Staubtemperaturen für eine große Zahl von Galaxien abzuleiten (Stickel et al. 2000). Es zeigte sich, daß große Mengen kalten Staubs mit einer Temperatur niedriger als 20 Kelvin bisher unentdeckt geblieben waren. Dies löste die Diskrepanz früherer, aus Messungen des IRAS-Satelliten ermittelter, sehr viel höherer Gas-zu-Staub-Verhältnisse (Devereux & Young 1990) auf. Die mit ISOSS erhaltenen Gas-zu-Staub-Verhältnisse sind dem unserer Milchstraße sehr ähnlich.

Die frühesten Phasen der Sternentstehung sind durch das Vorhandensein besonders kalten Staubs in dichten prästellaren Kernen und während der folgenden protostellaren Kollapsphase gekennzeichnet. Solche sogenannten Objekte der Klasse 0 (André et al. 1993) sind die Vorläufer sonnenähnlicher Sterne und können gut durch Energieverteilungen Schwarzer Körper mit Temperaturen zwischen 10 und 30 K beschrieben werden. Während massearme Protosterne in nahegelegenen Sternentstehungsregionen (Taurus, Ophiucus, ...) gefunden werden konnten, ist weit weniger über die physikalischen Anfangsbedingungen bekannt, die zur Bildung massereicher Sterne führen. Große Mengen von kaltem Gas und Staub in Verbindung mit einsetzender Sternentstehung machen solche entfernten Objekte zu leuchtkräftigen kompakten Quellen im fernen Infrarot. Die hohe Himmelsüberdeckung und Nachweisempfindlichkeit des ISOSS erlauben es, systematisch nach solchen Quellen zu suchen.

1.6 Aufbau der Doktorarbeit

In der vorliegenden Arbeit wurde die ISOPHOT Zufallsdurchmusterung zur Identifikation und Untersuchung von Frühphasen der massereichen Sternentstehung sowie von staubreichen Galaxien mit einer kalten Staubkomponente herangezogen. Obwohl die empfindlichen ISOSS-Messungen mit Hilfe eines gekühlten Weltraumteleskops die Suche nach solchen Quellen ermöglichen, erfordert die genaue Charakterisierung des physikalischen Zustands der Objekte die Kombination mit bodengebundenen Nachfolgebeobachtungen vom Optischen bis in den Radio-

bereich. Daraus ergibt sich der folgende Aufbau der Arbeit:

- Kapitel 2 beschreibt technische Vorarbeiten zur verlässlichen Identifikation kalter kompakter FIR-Quellen im ISOSS. Es wurde eine Methode entwickelt, redundante Messungen an Schwenkkreuzungen zu benutzen, um eine ausreichende photometrische Kalibrationsgenauigkeit zur Bestimmung der Farbtemperatur zu erzielen. Eine Komplikation beim Nachweis solcher Objekte stellt die Konfusion mit Knoten des interstellaren Zirrus dar. Aus den ISOSS-Daten erzeugte Karten hoher räumlicher Auflösung erlauben die Unterscheidung von solchen Zirrus-Strukturen und erhöhen die Nachweisempfindlichkeit schwacher Quellen.
- Kapitel 3 beschreibt eine neue Stichprobe massereicher Sternentstehungsgebiete, die durch Kreuzkorrelation mit Durchmusterungen in Moleküllinien identifiziert werden konnten. Nachfolgebeobachtungen des Staub-Kontinuums und der Ammoniak-Emission belegen, daß die Gas- und Staubtemperaturen dieser neuen Klasse von Objekten deutlich unter denen bisher untersuchter Objekte liegen.
- Um ein detailliertes Bild der Sternentstehung in kalten ISOSS-Quellen zeichnen zu können, wurde in Kapitel 4 eine Fallstudie des Objektes ISOSS J 20298+3559 durchgeführt. Vom Optischen bis in den cm-Bereich gewonnene Beobachtungsdaten belegen die Koexistenz prä- und protostellarer Objekte unterschiedlicher Entwicklungsphasen mit großen Mengen an kaltem Gas und Staub.
- Submillimeter-Nachfolgebeobachtungen konnten die aus den Daten der Zufallsdurchmusterung abgeleiteten großen Massen an kaltem Staub in einer Stichprobe leuchtkräftiger Galaxien bestätigen. Diese kalte Staubkomponente ist hinsichtlich ihrer Morphologie und Leuchtkraft gut mit nicht-thermischer Strahlung im cm-Bereich korreliert. Nicht gefunden wurde jedoch eine signifikante Komponente von sehr kaltem Staub ($T \sim 10$ K), über deren Existenz seit langem spekuliert wird. Diese Ergebnisse werden in Kapitel 5 diskutiert.
- Kapitel 6 enthält die Fallstudie eines der ungewöhnlichsten Objekte dieser Galaxienauswahl, ISOSS J 15079+7247. Es handelt sich um eine gas- und staubreiche elliptische Galaxie mit einer Leuchtkraft von $10^{12} L_{\odot}$ bei einer Rotverschiebung von $z \sim 0.2$. Ein Objekt mit diesen Eigenschaften war bislang nicht bekannt. Dieser Fund hat wichtige Implikationen für die Deutung der Submillimeter-Galaxien.
- Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf bereits angelaufene wissenschaftliche Nachfolgeprojekte, die sich aus dieser Dissertation ergeben haben.

Kapitel 2

Datenbasis und Himmelsatlas der Zufallsdurchmusterung

Es wurde eine Methode zur Herstellung zweidimensionaler Streifenkarten aus der ISOPHOT Zufallsdurchmusterung entwickelt und unter Verwendung aller Schwenkdaten des C200 Detektors damit ein $170\ \mu\text{m}$ Atlas des gesamten Himmels erzeugt. Die verwendete Pixelgröße der Karten von $22.5''$ erhält die volle räumliche Auflösung der ISOPHOT C200 Kamera ($1.5'$ FWHM) und macht die Ferninfrarot-Karten dieses Atlases zu einem neuen Datenprodukt bei der Untersuchung galaktischer und extragalaktischer Ferninfrarot-Quellen. Die Karten ergänzen dabei die bisherigen ISOSS-Quellenkataloge in idealer Weise:

1. Sie erleichtern vor allem in dicht überdeckten Himmelsregionen die Unterscheidung kompakter Quellen von ausgedehnten zweidimensionalen (Zirrus-)Strukturen. Dazu erhöht sich in den koadiierten Datenströmen von Schwenkkarten die Nachweisempfindlichkeit schwacher Quellen. Einzelne vollständig kartierte Gebiete der Zufallsdurchmusterung haben eine Ausdehnung bis zu 12° und stellen damit die größten vollständigen $170\ \mu\text{m}$ Karten hoher räumlicher Auflösung dar.
2. Der besondere Beobachtungsmodus der Zufallsdurchmusterung erlaubt eine hohe Kalibrationsgenauigkeit: Redundante Messungen an den Kreuzungspunkten unterschiedlicher Schwenks konnten aufgrund des einheitlichen Auslesemodus aller ISOSS-Messungen zur selbstkonsistenten Kalibration des gesamten Datensatzes benutzt werden. Dadurch konnte die photometrische Reproduzierbarkeit jedes einzelnen Schwenks signifikant verbessert und solche mit fehlerhafter Kalibration identifiziert und korrigiert werden. Die Korrektur solcher statistischer Ausreißer stellt einen für die in der Doktorarbeit durchgeführte Suche nach kalten Quellen besonders wichtigen Aspekt dar. Die erreichte relative photometrische Reproduzierbarkeit ist besser als 10% und ist damit ausreichend für die zuverlässige Identifikation derartiger Objekte.

Der Himmelsatlas erlaubte erstmalig die direkte Messung der Himmelsüberdeckung der Zufallsdurchmusterung. Sie beträgt 15% und bestätigt die bisherigen Abschätzungen.

2.1 Durchführung der ISOSS-Beobachtungen

Alle Schwenkbeobachtungen der Zufallsdurchmusterung wurden mit dem langwelligsten Detektor auf ISOPHOT, der C200-Kamera (Lemke et al. 1996), durchgeführt (siehe Abb. 1.3).

Jedes ihrer vier Bildelemente aus gedrücktem Ge:Ga besitzt ein Gesichtsfeld von $89.4'' \times 89.4''$. Aus technischen Gründen weisen benachbarte Pixel einen Spalt von $2.4''$ auf. Damit beträgt das gesamte Gesichtsfeld der C200-Kamera $181.2'' \times 181.2''$ und ist zu 97 % ausgefüllt. Zum Einsatz kam der Breitbandfilter C.160 mit einer Referenzwellenlänge von $170 \mu\text{m}$ und einer Bandbreite von $90 \mu\text{m}$ (Klaas et al. 1994). Die Verwendung dieses Filters erlaubte die beste Nachweisempfindlichkeit für schwache Objekte jenseits der IRAS Grenzwellenlänge von $100 \mu\text{m}$ (Bogun 1995).

Um die extrem schwachen Ströme durch die photoleitenden Bildelemente im Bereich 10^{-16} bis 10^{-13} A messen zu können, wurde bei der C200-Kamera eine aus invertierenden Verstärkern mit kapazitiver Rückkopplung bestehende Ausleseschaltung eingesetzt (Wolf et al. 1994). Damit wurde die von jedem Detektor gelieferte Ladung auf der Eingangskapazität des zugehörigen Verstärkers integriert. Das durch die zeitliche Ableitung der Kondensatorspannung ausgedrückte Detektorsignal S in Einheiten [V/s] ist proportional zum Photostrom und erlaubt die Bestimmung der auf den Detektor einfallenden Strahlungsleistung im Infraroten. Da der dynamische Spannungsbereich der Ausleseschaltung begrenzt ist, muß die Kapazität nach einem als Integrationszeit bezeichneten Intervall wieder entladen werden, bevor eine neue Integration beginnen kann. Wie Abb. 1.3 zeigt, war die als CRE (Cold Readout Electronics) bezeichnete Ausleseelektronik (Dierickx et al. 1989) unmittelbar bei den Detektoren auf dem kalten C200-Detektorblock untergebracht, um die Einkopplung von Störsignalen so klein wie möglich zu halten.

Zur Bestimmung des Detektorsignals wurde während jeder Integration die anwachsende Spannung an der Eingangskapazität der CRE in regelmäßigen Zeitintervallen abgetastet. Diese Rampen von Spannungspegeln stellen die Rohdaten der Zufallsdurchmusterung dar. Die Werte für Abtastrate und Integrationszeit mußten an die besonderen Anforderungen der Zufallsdurchmusterung angepaßt werden. Bei einer maximalen Schwenkgeschwindigkeit von $8'/\text{s}$ wurde deshalb die kürzeste Integrationsperiode von $1/8$ s vorgesehen. Dies beschränkt die Verbreiterung der Punktbildfunktion auf ein tolerierbares Maß. Um außerdem eine ausreichende Zahl von Rampenmeßpunkten zu erhalten, wurde die kleinstmögliche Abtastzeit von $1/32$ s verwendet. Dieses Ausleseschema wurde einheitlich für alle Messungen der Zufallsdurchmusterung eingesetzt. Während es für den Nachweis schwacher Quellen hervorragend geeignet ist, führte bei besonders hellen Quellen die verhältnismäßig lange Integrationszeit zur Sättigung der Ausleseelektronik. Dies ist in Abb. 2.1 zu sehen: Im Bereich des galaktischen Zentralgebietes (galaktische Länge $l > 300^\circ$ bzw. $l < 60^\circ$) und in einzelnen besonders hellen Regionen außerhalb der Ebene (z.B. ρ Oph, Cygnus) konnten keine Intensitäten mehr ermittelt werden, da dort weniger als zwei nutzbare Spannungspegel pro Rampe vorliegen.

Schwenkmessungen wurden immer dann durchgeführt, wenn die Dauer des Schwenks mehr als 30 s betrug, um zu Beginn des Schwenks die notwendigen instrumentellen Konfigurationsänderungen durchführen zu können. Keine Schwenkmessungen wurden während spezieller Kartierungs- und Kalibrationsprogramme von ISOPHOT durchgeführt, um die Konsistenz der Daten nicht zu gefährden. Insgesamt konnten während der 29 Monate dauernden ISO-Mission 11847 Schwenkmessungen mit einer integrierten Gesamtlänge von über 150000° durchgeführt werden.

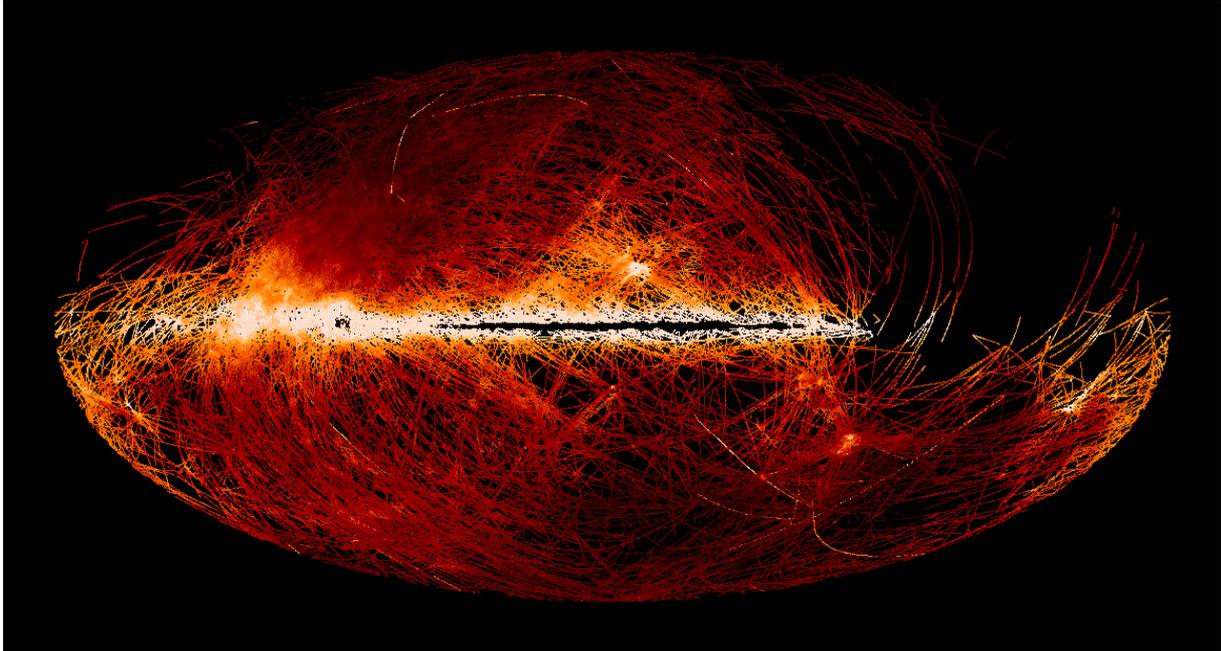


Abbildung 2.1: Ansicht des Himmels bei $170 \mu\text{m}$, dargestellt in galaktischen Koordinaten. Die Karte ist aus den einzelnen Schwenks der Zufallsdurchmusterung zusammengesetzt. Die Zentralebene der Milchstraße ist aufgrund ihrer Staubemission als helles Band in der Bildmitte zu erkennen. Verteilter Staub in interstellaren Zirrus-Wolken ist bis zu hohen galaktischen Breiten zu erkennen. (Bild Stickel)

2.2 Prozessierung der ISOSS-Daten

Der vom ISO-Satelliten empfangene Telemetriedatenstrom wurde zunächst in den einzelnen Beobachtungen zugehörige Blöcke aufgespalten und in ein für weitere Programmpakete lesbares FITS-Datenformat der Prozessierungsstufe ERD (“Edited Raw Data”) übersetzt. Von besonderer Bedeutung ist die darin eingeschlossene Korrektur der Astrometrie. Die Schwenkbahn ist jedoch keineswegs geradlinig, sondern hängt von den anfänglichen Geschwindigkeiten der Trägheitsräder des Satelliten ab. Da während eines Satellitenschwenks keine genaue Positionserfassung mit Hilfe von Sternsensoren erfolgt, können diese Werte nur aus den Signalen der zur Lageregelung verwendeten Kreiselmechanismen abgeleitet werden. Erst am Ende des Schwenks erfolgt für das nächste Beobachtungsobjekt wieder eine unabhängige Positionsmessung. Im Rahmen der sog. Drift-Korrektur wird die so ermittelte Positionsabweichung gleichmäßig auf die Länge des zuvor erfolgten Schwenks verteilt. Bisherige Untersuchungen der Positionsgenauigkeit von ISOSS zeigen, daß diese besser als $20''$ (1σ) ist (Müller et al. 2002, Stickel et al. 2000).

Die Signalkonversion zu Flächenhelligkeiten sowie die Zuordnung der Positionsdaten aller Messungen wurde vollautomatisch mit dem Programmpaket PIA (Phot Interactive Analysis, Gabriel et al. 1997) in der Version 7.2 durchgeführt. Neben der Helligkeitsbestimmung aus den Rampensteigungen schließt sie wichtige Korrekturen von instrumentellen Effekten ein:

- Erkennung von Detektorsättigung
- Korrektur nichtlinearen Verhaltens von Detektor und Ausleseschaltung

- Subtraktion des von der Orbitalposition abhängigen Dunkelstroms
- Konversion in Flächenhelligkeiten mit dem effektiven Raumwinkel des Detektors
- Auswertung der Kalibrationsmessungen zur Bestimmung der aktuellen Stromempfindlichkeit des Detektors (siehe Abschnitt 2.4)

Mit Hilfe letzterer erfolgte die Umrechnung der Detektorsignale in Helligkeiten pro Bildelement [Jy/pixel]. Diese Daten der Prozessierungsstufe SMC (“Serendipity Mode Calibrated”) stellen den Ausgangspunkt für die astronomische Datenanalyse dar.

2.3 Quellenextraktion

Aufbauend auf der Prozessierungsstufe SMC sind am ISOPHOT-Datenzentrum Algorithmen zur Quellenextraktion aus der Zufallsdurchmusterung entwickelt worden. Die bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten konzentrierten sich dabei auf die schwenkspezifische Quellenextraktion. Hierbei wurden Helligkeit und Position von Objekten aus der Abfolge des Intensitätsverlaufs in den vier Kamera-Pixeln individueller Schwenks abgeleitet. Solche Methoden sind von Bogun et al. (1996), Hotzel (2001) und Stickel et al. (1998a) beschrieben und erfolgreich bei der Identifikation von Galaxien (Stickel et al. 2000) und kalten Knoten unserer Milchstraße (Hotzel 2001) eingesetzt worden. Bei Hotzel (2001) wurde dabei zur Bestimmung von Farbtemperaturen ausgedehnter Strukturen die hohe natürliche Auflösung der 170 μm Daten auf 4.4' gesenkt, um für die Suche nach kalten ausgedehnten Strukturen einen Vergleich mit den 100 μm Karten des IRAS-Himmelsatlas (ISSA) durchführen zu können.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Suche nach kalten kompakten Quellen ist das von Stickel et al. (1998a) entwickelte Verfahren der Quellenextraktion hervorragend geeignet. In diesem Verfahren wurde mit Hilfe eines morphologischen Filters zunächst ein lokaler Hintergrund abgeleitet. Quellenkandidaten wurden als kompakte ($\text{FWHM} < 7'$) Intensitätsmaxima definiert, die ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis größer 3 über dem lokalen Hintergrund der koadiierten Datenströme der Detektorpixel lagen. Weil die hochempfindlichen Ge:Ga-Detektoren der C200-Kamera auch empfindlich auf Treffer kosmischer Teilchenstrahlung reagierten, mußten solche Strahlungsartefakte, die mit typischen Raten von ~ 0.1 Hz auftraten, aus den Daten entfernt werden. Der Quellfluß wurde durch Anpassung einer zweidimensionalen Gauss-Funktion an die einzelnen Datenströme der Detektorpixel unter Berücksichtigung von deren Lage am Himmel bestimmt. Das Verfahren ist gut geeignet, den Gesamtfluß von Quellen abzuleiten, die nicht wesentlich größer als das Gesichtsfeld der C200-Kamera sind. Zur Vermeidung von Fehlern durch Flußextrapolation sollte die Quelle darüberhinaus innerhalb des geometrischen Detektorbereiches liegen. Stickel et al. (2002) konnten mit diesem Verfahren ca. 325000 kompakte Quellenkandidaten in der Zufallsdurchmusterung identifizieren. Ein großer Teil dieser Objekte sind kompakte Strukturen des interstellaren Zirrus, die entweder elongiert sind und nahezu senkrecht zu ihrer großen Achse überfahren wurden oder ein helles Zentralgebiet aufweisen. Der während des Schwenks über ein solches Objekt aufgezeichnete Helligkeitsverlauf ist kaum von generischen Punktquellen zu unterscheiden.

Zur Vermeidung dieser Schwierigkeit wurden in dieser Arbeit zusätzlich Quellen unter Verwendung von 170 μm -Karten der Zufallsdurchmusterung identifiziert (zur Herstellung solcher Kar-

ten siehe Abschnitt 2.7). Karten ermöglichen die Unterscheidung von Punktquellen und zweidimensionalen (Zirrus-)Strukturen, vor allem in dicht überdeckten Himmelsregionen. So wurden eine Reihe wichtiger Gebiete des Himmels, wie die galaktische Ebene oder der nördliche Pol der Ekliptik, besonders häufig von Satellitenschwenks überfahren: Im Falle der Galaktischen Ebene lag dies an der Vielzahl der dort verteilten Beobachtungsobjekte, der ekliptikale Nordpol hatte eine hohe Sichtbarkeit und viele wichtige Kalibrationsquellen lagen in diesem Gebiet. Die dichte Überdeckung erhöht in den koaddierten Datenströmen mehrerer Schwenks die Nachweisempfindlichkeit schwacher Quellen. Dies war besonders für die Identifikation von Galaxien (Kapitel 5) wichtig. Bei der Kartenerzeugung konnten Pixel mit Exzeßrauschen aufgrund heftiger ionisierender Teilchentreffer in den Schwenks identifiziert und für die weitere Datenanalyse besonders markiert werden. Bei der auf Einzelschwenks beschränkten Prozessierung wurde die Suche nach Quellenkandidaten oftmals durch solche rauschenden Pixel gestört. Quellenkandidaten wurden in diesen Regionen mit dem Algorithmus von Bertin et al. (1996) identifiziert. Damit konnten Quellen gefunden werden, deren Helligkeitsmaximum einen Rauschabstand $> 3\sigma$ über dem lokalen Hintergrund aufwies.

2.4 Kalibrationsstrategie des ISOSS

Die für die Kalibration der ISOSS-Daten wichtigste Detektoreigenschaft ist die Stromempfindlichkeit R (engl.: Responsivity) der C200-Kamerapixel. Sie beschreibt das Detektorverhalten bei Beleuchtung und ist als das Verhältnis von ausgelöstem Photostrom I zur einfallenden Infrarot-Strahlungsleistung P auf den Detektor definiert:

$$R = \frac{(I - I_d)}{P} \quad [\text{A/W}] \quad (2.1)$$

wobei I_d den Dunkelstrom bezeichnet. Zur Bestimmung der einfallenden Intensität am Himmel muß die Transmission von Teleskop und Instrument berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zu optischen CCD-Detektoren sind die eingesetzten Photoleiter in ihrem Empfindlichkeitsverhalten lediglich während Zeitintervallen von ~ 20 min, also während der Dauer eines Satellitenschwenks, stabil. Auf längeren Zeitskalen zeigt die Stromempfindlichkeit Veränderungen sowohl durch den Einfluß ionisierender Teilchenstrahlung im All als auch aufgrund der unmittelbaren Vorgeschichte der Infrarotbestrahlung. Es wurden Variationen bis zu einem Faktor 3 während einer Erdumkreisung beobachtet (Schulz et al. 2002). Insbesondere zeigt die Stromempfindlichkeit eine starke Abhängigkeit von der Orbitalphase des ISO-Satelliten (siehe auch Abb. 2.4). Um die Stromempfindlichkeit wieder auf einen definierten Wert zu bringen, wurden die Detektoren bei jeder Erdumkreisung nach Durchfliegen der Strahlungsgürtel im Bereich des Perigäums und im Apogäum einer besonderen ‐Ausheil‐-Prozedur ausgesetzt (Lemke et al. 1996).

Zur photometrischen Kalibration besaß ISOPHOT zwei stabile interne Eichquellen, sog. FCS (‐Fine Calibration Sources‐). Diese heizbaren Quellen konnten mit Hilfe des Fokalebene-Choppers auf den C200-Detektor abgebildet werden. Als Heizelemente wurde mit NiCr bedampfte Diamantplättchen eingesetzt, die das Spektrum eines Grauen Körpers lieferten. Durch Änderung der Heizleistung konnte ihre Abstrahlung auf die erwartete Strahlungsleistung der Himmelsquelle abgestimmt werden. Im Falle der Zufallsdurchmusterung betrug die Heizleistung 0.364 mW, was einer Signalaussteuerung von etwa 20 % entsprach. Die Intensität der

Heizquellen war mit einer relativen Genauigkeit von besser als 2 % äußerst stabil. Die Strahlungsleistung der Eichquellen wurde während der Mission permanent gegen ein photometrisches Referenzsystem aus primären Standardquellen am Himmel (Sterne, Planeten, Asteroiden) absolut kalibriert.

Ob eine solche FCS-Messung bei der jeweiligen Schwenkbeobachtung durchgeführt wurde, war von deren zeitlicher Länge abhängig. Bei mehr als 75s Schwenkdauer wurde eine 16s andauernde Messung mit einer der beiden internen Kalibrationsquellen durchgeführt, um die augenblickliche Empfindlichkeit der vier Detektorpixel zu messen. Bei kürzerer Schwenkdauer wurde eine von der Orbitalposition abhängige Standardempfindlichkeit angewendet. Diese ergab sich aus dem Mittelwert aller FCS-Messungen pointierter Beobachtungen, die bei einer gegebenen Orbitalposition durchgeführt wurden.

Die Bestimmung der Stromempfindlichkeit R aus der 16 s langen FCS-Messung wird durch die folgenden Fehlerquellen beeinträchtigt:

- Signaltransienten (Acosta-Pulido et al. 2000)
- Strahlungsartefakte (Gabriel & Acosta-Pulido 2000)
- Signalabhängigkeiten (Schulz et al. 2002)
- Streulichtanteil des Himmelshintergrunds (Hotzel, private Mitteilung)

Bei ausschließlich mit dem Standardwert der Stromempfindlichkeit kalibrierten kurzen Schwenkbeobachtungen ist mit einem mittleren Fehler von $\Delta R/R \sim 10\%$ zu rechnen (Wilke, private Mitteilung).

Die photometrische Reproduzierbarkeit einzelner Schwenkmessungen wurde an den Kreuzungspunkten von Schwenks bestimmt. Wie Abb. 2.1 zeigt, gibt es eine große Zahl solcher Überschneidungen. I_j, I_k sei das Wertepaar der über den Überlappungsbereich gemittelten Flächenhelligkeit zweier Schwenks j, k an einem solchen Kreuzungspunkt. Die untere Kurve in Abb. 2.2 zeigt die Verteilung der relativen Abweichung $\pm \Delta I_{j,k} / 2\bar{I}$ solcher Paare bezogen auf den jeweiligen Mittelwert \bar{I} . Die Zahl der Paare als Funktion der relativen Abweichung folgt in guter Näherung einer Normalverteilung mit einer Standardabweichung von $\sigma \sim 20\%$. Bezieht man sich auf die Reproduzierbarkeit einer Einzelmessung, muß σ noch mit einem Faktor $\sqrt{2}$ multipliziert werden.

2.5 Die Methode der selbstkonsistenten Kreuzkalibration

Eine signifikante Verbesserung der Kalibrationsgenauigkeit konnte durch die Berücksichtigung von redundanter Helligkeitsinformation an Kreuzungspunkten und Überlappungen von Satellitenschwenks erzielt werden. Messungen der Flächenhelligkeit an einer festen Himmelsposition sollten die gleiche Intensität ergeben. Abweichungen treten allenfalls durch das zeitlich variable Zodiaklicht oder durch bewegte Objekte des Sonnensystems (Planeten, Asteroiden, Kometen) auf. Stimmen die gemessenen Helligkeiten nach Korrektur des zeitabhängigen Terms nicht überein, liegt dies an der Ungenauigkeit der Bestimmung der Stromempfindlichkeit. Da sich Fehler bei der Bestimmung der Stromempfindlichkeit R multiplikativ auf die Flächenhelligkeit auswirken, ist es das Ziel der selbstkonsistenten Kreuzkalibration, für jeden Schwenk j einen mul-

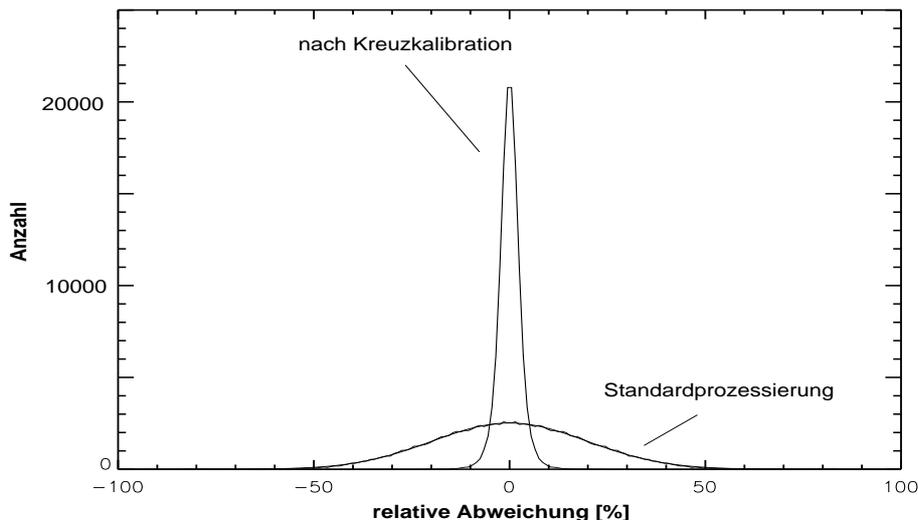


Abbildung 2.2: Relative Abweichungen an Kreuzungspunkten unterschiedlicher Schwenks. Die untere Kurve zeigt die Daten der PIA-Prozessierung, die obere nach Anwendung der hier entwickelten Methode der selbstkonsistenten Kreuzkalibration. Durch eine Neubestimmung der Stromempfindlichkeiten der Schwenkmessungen konnte die photometrische Wiederholgenauigkeit wesentlich gesteigert werden, was für eine genaue Flußbestimmung und die Erzeugung von Karten entscheidend ist.

tiplikativen Korrekturfaktor C_j derart zu bestimmen, daß die Summe aller Abweichungen an Kreuzungspunkten ein Minimum ergibt.

In einem ersten Schritt wurden alle Kreuzungspunkte zwischen zwei unterschiedlichen Schwenks identifiziert. Für 9983 Schwenks gibt es insgesamt 269194 solcher Kreuzungspunkte. Damit liegen im Mittel pro Schwenk 27 unabhängige Vergleichsmessungen vor, was eine Erhöhung des Genauigkeit bei der Bestimmung der Stromempfindlichkeit erlaubt.

I_j, I_k sollen im folgenden die Flächenhelligkeit an einem solchen Kreuzungspunkt bezeichnen. Um den Einfluß bewegter Objekte zu eliminieren, wurden für diesen Abgleich räumlich geglättete Daten verwendet, die gleichzeitig den Einfluß von Fehlern der Astrometrie verringern. Dazu wurden nach Stickel et al. (1998) mit einem morphologischen Filter behandelte Daten I_j^* verwendet. Damit sind die gesuchten Korrekturfaktoren an den Kreuzungspunkten wie folgt definiert:

$$I_j^* C_j - Z_j = I_k^* C_k - Z_k \quad (2.2)$$

Das größte zeitlich veränderliche Signal Z_j in der Zufallsdurchmusterung stellt das Zodiaklicht dar. Um seine Helligkeit im ISOSS 170 μm Band zu bestimmen, wurde das SIRTF-Zodiaklichtmodell (Reach 2000) verwendet. Dieses basiert auf dem geometrischen Modell der interplanetaren Staubverteilung, die im Rahmen der Satellitenmission COBE mit Hilfe des DIRBE-Instruments abgeleitet werden konnte (Kelsall et al. 1998). Dem Modell liegen außerdem Messungen des Zodiaklichtspektrums mit COBE-FIRAS für $\lambda > 100 \mu\text{m}$ zugrunde (Fixsen & Dwek 2002). Werte für die orts- und zeitabhängige Zodiakallichthelligkeit können mit dem SIRTF-ZL-Modell leider nur für das SIRTF 160 μm Band berechnet werden. Eine Korrektur auf das 170 μm Band wurde auf Basis der mit COBE-FIRAS gemessenen Temperatur und Emissivität vorgenommen. Reach (2000) gibt für das SIRTF-Modell einen maximalen relativen

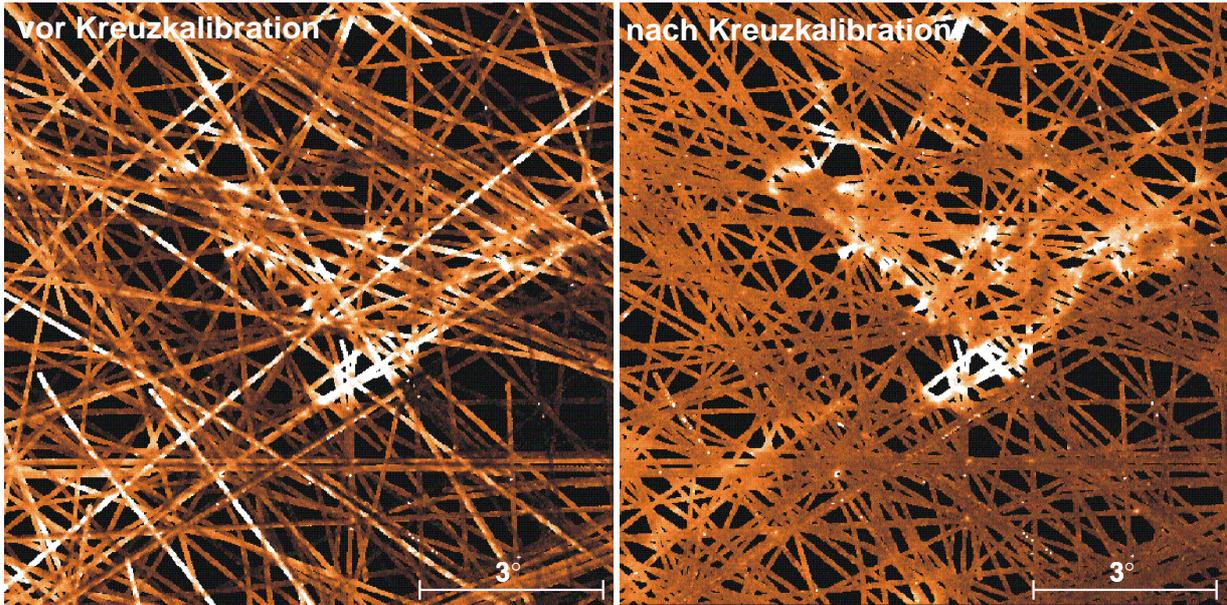


Abbildung 2.3: Aus Schwenks der Zufallsdurchmusterung erzeugte $170 \mu\text{m}$ Karten. Dargestellt ist ein $10^\circ \times 10^\circ$ großer Bereich um die Draco-Wolke, ein Gebiet galaktischer Zirkus-Strukturen bei hoher galaktischer Breite. Während die linke Karte aus Schwenkmessungen der PIA-Standardprozessierung erzeugt wurde, zeigt das rechte Bild die Daten nach der Kreuzkalibration. Die photometrische Reproduzierbarkeit konnte mit Hilfe dieses Verfahrens signifikant verbessert werden, was vor allem das Erkennen schwacher ausgedehnter Strukturen ermöglicht. Der dargestellte Flächenhelligkeitsbereich reicht von 5 bis 10 MJy/sr .

Fehler von 10 % in der Helligkeit an. Einschließlich der Fehler bei der Transformation auf das ISOSS $170 \mu\text{m}$ Band beträgt die relative Genauigkeit $\Delta Z/Z \lesssim 20 \%$.

Dieser korrigierte Wert des SIRTf Zodiaklichtmodell wurde benutzt, um an allen 269194 Kreuzungspunkten zum Zeitpunkt der jeweiligen Schwenkbeobachtung die Flächenhelligkeit des Zodiaklichts Z_j, Z_k zu bestimmen. Die Zodiakallichthelligkeit schwankt zwischen maximal 5.0 MJy/sr in der Ekliptik und 0.6 MJy/sr bei hohen ekliptikalen Breiten, der Mittelwert aller Messungen beträgt 1.14 MJy/sr . Der Einfluß auf die ISOSS-Daten ist somit insgesamt gering. Auch die Missionsplanungsstrategie von ISO, am Himmel benachbarte Objekte zu zusammenhängenden Zeitpunkten zu beobachten, reduzierte die Kontamination durch Zodiaklicht. Dies zeigt die sehr geringe mittlere Differenz $|Z_j - Z_k| = 0.25 \text{ MJy/sr}$ der Zodiakallichtwerte an Kreuzungspunkten.

Die Bestimmung der Korrekturfaktoren C_j erfolgte in einem Schritt für alle Schwenks durch Minimierung von Gleichung 2.3. Durch Wahl des Parameters σ_{jk} wurde allen Kreuzungspunkten das gleiche Gewicht gegeben.

$$\chi^2 = \sum_{k>j} \left[\frac{I_j^* C_j - Z_j - I_k^* C_k + Z_k}{\sigma_{jk}} \right]^2 \quad (2.3)$$

Eine effiziente Lösung dieses Systems konnte mit Hilfe des Algorithmus von Paige & Sanders (1982) durchgeführt werden.

Wie die obere Kurve in Abb. 2.2 zeigt, konnte die photometrische Reproduzierbarkeit durch

Anwendung der Kreuzkalibration im dargestellten Himmelsgebiet um mehr als eine Größenordnung verbessert werden. Abb. 2.3 zeigt den Qualitätsgewinn der Methode für die Erstellung von Karten aus den ISOSS-Daten. Nach Durchführung der Kreuzkalibration werden schwache ausgedehnte Strukturen erkennbar. Die Karte zeigt eindrucksvoll, daß ein Großteil der aus der FCS-Messung stammenden Kalibrationsungenauigkeit mit dem Verfahren wieder behoben werden konnte. Abb. 2.4 zeigt die aus den Korrekturfaktoren berechneten wahren Stromempfindlichkeiten für die vier Detektorpixel aller 9983 Schwenkmessungen. Wie aus den Werten dieser Abbildung zu sehen ist, treten vor allem gegen Ende des Orbits starke Erhöhungen der Stromempfindlichkeit auf. Diese können bei ausschließlich mit einer Standardempfindlichkeit kalibrierten Schwenks zu signifikanten Kalibrationsfehlern bis zu einem Faktor 3 führen. Auch durch Einflüsse wie Strahlungsausbrüche unserer Sonne kann die Detektorempfindlichkeit zeitweise stark überhöht sein.

Es ist noch anzumerken, daß die Kreuzkalibration keine Veränderung der ISOSS-Absolutkalibration hervorruft. Wie eine Überprüfung zeigte, blieb diese bei der Anwendung des Verfahrens im gesamten Intensitätsbereich bis 500 MJy/sr auf besser als 5 % konstant.

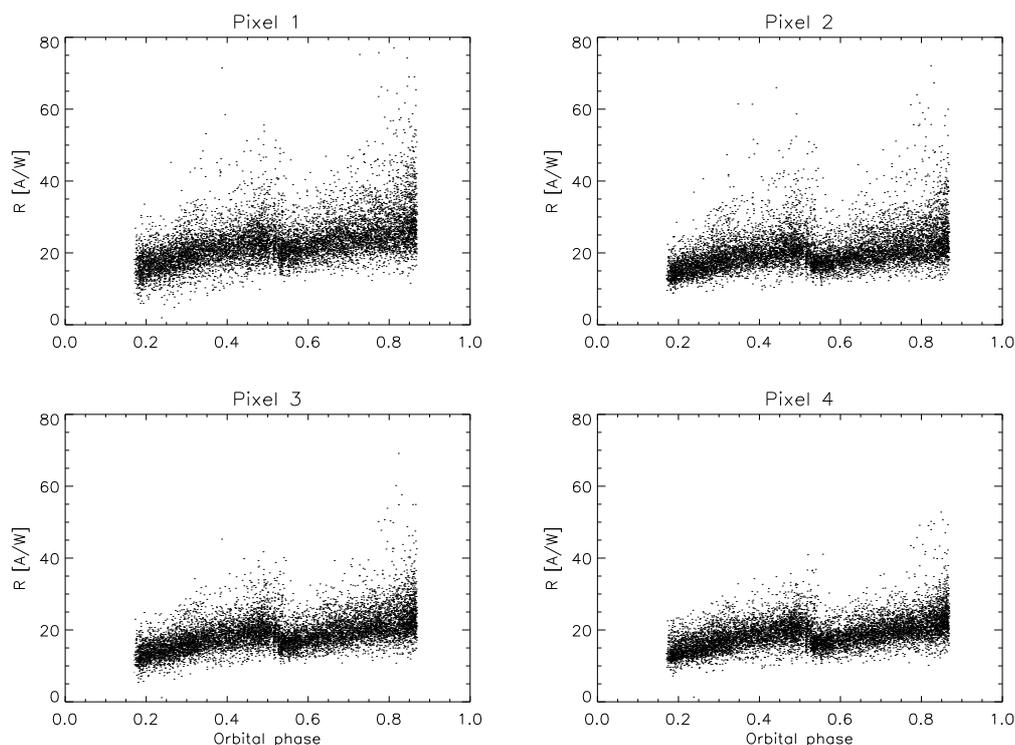


Abbildung 2.4: Aus der Kreuzkalibration abgeleitete Stromempfindlichkeiten der vier Bildelemente der C200-Kamera. Sie sind über der Orbitalphase der Messung aufgetragen. Wie zu sehen ist, steigt durch kosmische Teilchenstrahlung die Empfindlichkeit monoton an und wird zu den Zeitpunkten 0.1 und 0.5 durch interne Strahlungsbehandlung des Detektors wieder gesenkt. Besonders beim Wiedereintritt in die Strahlungsgürtel der Erde am Ende des Beobachtungsfensters sind die Detektorempfindlichkeiten zeitweise stark überhöht. Dies zeigen einzelne Meßpunkte, die bis zu einem Faktor 3 über der mittleren Empfindlichkeit liegen.

2.6 Kalibrationsgenauigkeit

Zur Überprüfung der absoluten Kalibrationsgenauigkeit der rekalierten ISOSS-Daten wurden die aus der Punktquellen-Datenbank entnommenen Flüsse aller in der Zufallsdurchmusterung detektierten Planeten und Asteroiden (Müller et al. 2002) mit dem Korrekturfaktor des entsprechenden Schwenks multipliziert und mit theoretischen Flußvorhersagen verglichen. Eine ausschließlich auf solchen Standardquellen beruhende Absolutkalibration bietet zwei wichtige Vorteile:

- Alle Objekte sind räumlich nicht aufgelöst und eignen sich deshalb ausgezeichnet für die Punktquellenkalibration von ISOSS.
- Die absolute Genauigkeit der Modellflüsse ist besser als 10 %.

Die Asteroidenflüsse stammen aus den thermophysikalischen Modellen von Müller & Langeros (1998), die der Planeten von Griffin & Orton (1993). Uranus und Neptun konnten gut in der Zufallsdurchmusterung beobachtet werden. Die anderen Planeten sind zu hell und führten zur Sättigung der Ausleselektronik.

Wie Abb. 2.5 zeigt, besteht eine systematische Abweichung zwischen den abgeleiteten und vorhergesagten Helligkeiten. Für helle Quellen ergibt die Kalibration typischerweise nur etwa 50 % des erwarteten Flusses. Dies belegen auch ISOSS-Messungen des Planetarischen Nebel NGC 6543, der als Kalibrationsquelle der Spektrometer auf ISO besonders häufig beobachtet wurde und für den genaue photometrische Messungen mit ISOPHOT vorliegen. Ein solcher Flußverlust deutet auf ein Transientenverhalten des Detektors beim Überfahren heller Quellen hin. Die Standardabweichung der Messungen gegenüber der in Abb. 2.5 gezeigten Ausgleichsfunktion beträgt 10 %. Dies ist weniger als bei bisherigen Untersuchungen (z.B. Stickel et al. 2000) ohne Kreuzkalibration. Der verbleibende Meßfehler ist aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Flußbestimmung (Anpassung der Gauss-Funktion) etwas größer als die aus der Kreuzkalibration des gesamten Himmels abgeleitete Reproduzierbarkeit von 6 %.

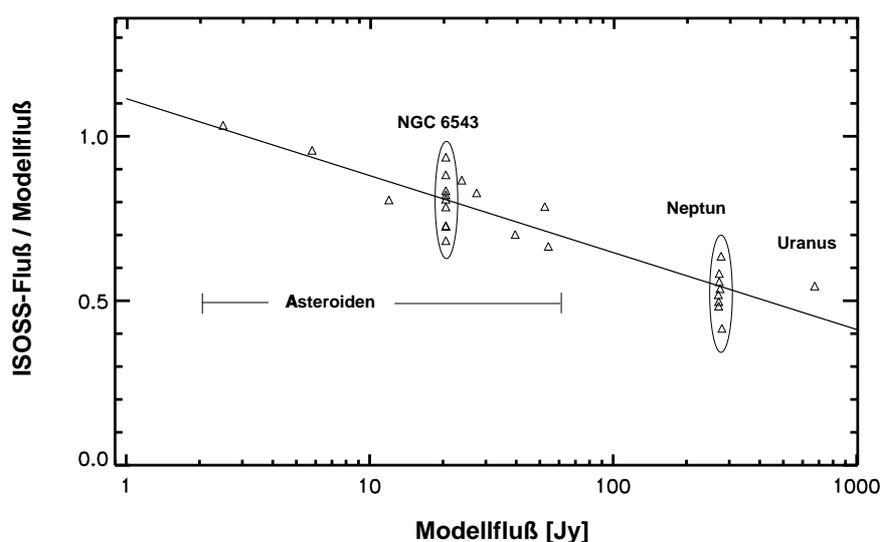


Abbildung 2.5: Vergleich der Modellflüsse von Asteroiden, Planeten sowie der Kalibrationsquelle NGC 6543 mit den Meßwerten aus der Zufallsdurchmusterung. Für helle Quellen werden typischerweise nur etwa 50 % des erwarteten Flusses detektiert.

Alle in der Arbeit verwendeten Flüsse der Punktquellen-Datenbank wurden mit dem Korrekturfaktor des entsprechenden Schwenks multipliziert und gemäß der Korrekturfunktion aus Abb. 2.5 umskaliert.

2.7 Karten aus der Zufallsdurchmusterung

Aufgrund der variablen Schwenkgeschwindigkeit und Orientierung des Detektors während der ISOSS-Schwenkmessungen sind die Zentralpositionen der C200-Kamerapixel am Himmel in einem unregelmäßigen Gitter angeordnet. Um daraus Karten der Flächenhelligkeit bei $170 \mu\text{m}$ zu erstellen, wurden die ursprünglichen Helligkeitsmessungen auf ein regelmäßiges Gitter abgebildet. Durch Wahl einer geeigneten Auflösung bietet dieses neue Gitter einen weiteren wichtigen Vorteil: Da die theoretische Auflösung des ISO-Teleskops bei $170 \mu\text{m}$ etwa $60''$ FWHM, die Seitenlänge der Detektorpixel jedoch $89''$ beträgt, sind die ISOSS-Messungen nach Faltung der Punktbildfunktion des Teleskops mit der Eintrittspupille des Detektors nicht mehr voll beugungsbegrenzt. Durch Abtastung auf einem Gitter mit mindestens der doppelten räumlichen Nyquist-Frequenz kann im Falle dicht liegender Meßpunkte die optische Beugungsgrenze wieder hergestellt werden.

Ein für die Restauration von Bilddaten mit diesen Eigenschaften geeigneter Algorithmus, der sogenannte "Drizzle"-Algorithmus, wurde von Fruchter & Hook (2002) beschrieben und für die Reduktion von Bilddaten entwickelt, die mit dem Weltraumteleskop Hubble gewonnen wurden. Abb. 2.6 illustriert das zugrundeliegende Prinzip. Die Flächenhelligkeiten der Karten $I_{x_0y_0}$ sind danach aus den ursprünglich gemessenen Flächenhelligkeiten $i_{x_iy_i}$ des Detektors durch folgende lineare Beziehungen gegeben:

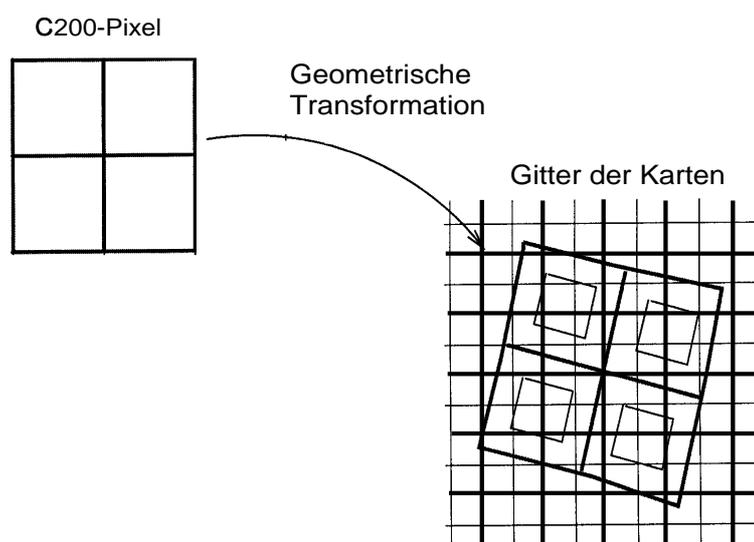


Abbildung 2.6: Darstellung des eingesetzten "Drizzle"-Verfahrens zur Erzeugung von Karten aus der Zufallsdurchmusterung. Um die Abbildung der transformierten Kamera-Pixel nicht durch die neuerliche Abtastung im Randbereich zu vergrößern, wurden diese auf 80 % der ursprünglichen Kantenlänge verkleinert (innenliegende kleinere Quadrate). (Abbildung nach Fruchter & Hook 2002)

$$W_{x_0y_0} = \sum_i a_{x_iy_ix_0y_0} i_{x_iy_i} \quad I_{x_0y_0} = \sum_i \frac{a_{x_iy_ix_0y_0} i_{x_iy_i} w_{x_iy_i}}{W_{x_0y_0}} \quad (2.4)$$

Dabei bezeichnen (x_i, y_i) die Koordinaten der Kamera-Pixel und (x_0, y_0) die Koordinaten der resultierenden Karte, sowie $w_{x_iy_i}$ bzw. $W_{x_0y_0}$ deren Gewichtung. Gleichung 2.4 ist dabei als Summe über die vier C200-Pixel ($i = 1 \dots 4$) zu verstehen, wobei $a_{x_iy_ix_0y_0}$ die geometrische Überlappung ($0 < a < 1$) des Kartenpixels (x_0, y_0) durch das Kamera-Pixel (x_i, y_i) angibt. Die Flächenhelligkeit bleibt während der Transformation der Daten erhalten.

2.8 Der ISOSS 170 μm Himmelsatlas

Das im letzten Abschnitt beschriebene Verfahren fand bei allen Schwenkmessungen der Zufalldurchmusterung Anwendung, um einen (im Rahmen der Himmelsabdeckung möglichen) 170 μm Atlas des gesamten Himmels zu erzeugen. Um die volle räumliche Auflösung der ISOPHOT-Messungen zu erhalten, wurde für diesen Atlas eine Pixelgröße von $22.4'' \times 22.4''$ gewählt. Dies erlaubt ausreichendes Oversampling des Detektors. Daraus resultiert eine Gesamtzahl von 1.07×10^9 Bildpunkten. Um einen effizienten Zugriff auf die große Datenmenge zu ermöglichen, wurde der Himmel in 108 überlappende Teilbereiche einer Größe von $20^\circ \times 20^\circ$ aufgeteilt. Die Bildinformation liegt in diesen Feldern in gnomonischer Projektion galaktischer Koordinaten vor. Spezielle Programm-Routinen erlauben die Erzeugung beliebiger anderer Bildausschnitte und die Transformation in andere Koordinatensysteme bzw. Projektionen. Abb. 2.7 gibt einen Überblick über die Folge der durchgeführten Prozessierungsschritte.

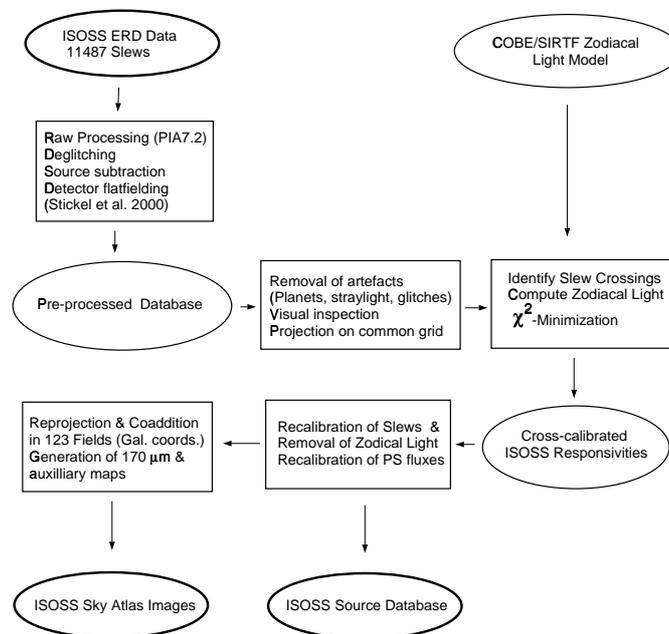


Abbildung 2.7: Prozessierungsschritte bei der durchgeführten Kreuzkalibration der Schwenkmessungen und der Erzeugung des Himmelsatlas. In einem ersten Schritt wurden die vorprozessierten Daten auf ein hochaufgelöstes Gitter projiziert. Dies erlaubte die Identifizierung von Kreuzungspunkten zwischen Schwenks und deren Behandlung zur Bestimmung selbstkonsistenter Detektorempfindlichkeiten in einem zweiten Schritt.

Neben der geometrischen Reprojektion wurde unter anderem der Beitrag des Zodiakallichts subtrahiert, Störungen von Planeten und Asteroiden entfernt sowie eine visuelle Überprüfung aller Schwenks zur Entfernung von Bereichen erhöhten Rauschens durchgeführt. Abb. 2.8 zeigt einen Ausschnitt aus dem so erzeugten Himmelsatlas.

Trotz der deutlich größeren Wellenlänge wurde mit ISOSS mit $1.5'$ (FWHM) eine der IRAS-Mission bei $100\mu\text{m}$ vergleichbare räumliche Auflösung erreicht (Cao et al. 1997), was einen direkten Vergleich der $100\mu\text{m}$ und $170\mu\text{m}$ Daten erlaubt. Dies gilt auch hinsichtlich der Nachweisgrenze der Durchmusterungen, die in beiden Fällen bei 1 Jy liegt.

Die geometrische Abbildung der Daten ermöglicht die direkte Messung der Himmelsüberdeckung. Bisher wurde dieser für Quellenzählungen wichtige Wert aus der statistischen Abschätzung des Produktes von gesamter Schwenklänge und mittlerer Detektorbreite senkrecht zur Schwenkrichtung bestimmt (Hotzel 2001). Bei dieser Berechnung bleiben jedoch Überschneidungen von Schwenkmessungen und die wahre Orientierung des Detektors unberücksichtigt. Mit Hilfe des Himmelsatlas kann die wahre Überdeckung helligkeitsabhängig durch Abzählen der jeweiligen Bildelemente bestimmt werden. Die gesamte Himmelsüberdeckung beträgt 15% , was mit bisherigen Abschätzungen übereinstimmt.

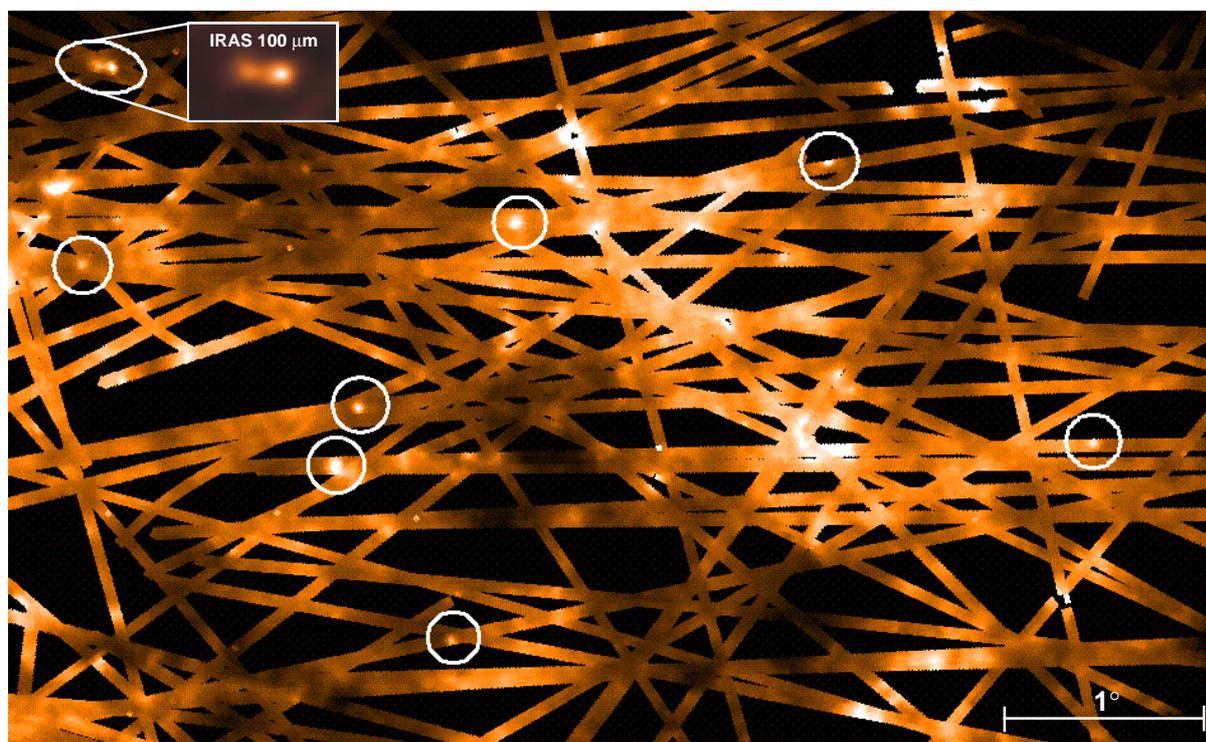


Abbildung 2.8: Beispiel einer Karte aus dem Atlas der $170\mu\text{m}$ Himmelsdurchmusterung. Der dargestellte Ausschnitt im Sternbild Schwan gibt einen Eindruck von der typischen Himmelsüberdeckung der Zufallsdurchmusterung im Bereich der nördlichen galaktischen Ebene. Kompakte Objekte der Punktquellen-Datenbank sind durch Kreise gekennzeichnet. Die dargestellte Flächenhelligkeit reicht von 150 bis 500 MJy/sr . Der Vergleich zweier eng beieinander liegender Punktquellen (Ellipse oben links) mit einer entsprechenden Ausschnittsvergrößerung aus dem IRAS $100\mu\text{m}$ HIRES-Atlas (Cao et al. 1997) demonstriert die ähnliche Winkelauflösung der beiden Durchmusterungen.

Kapitel 3

Entstehungsgebiete massereicher Sterne

In der Zufallsdurchmusterung wurden 193 kompakte Ferninfrarotquellen identifiziert, die mit molekularem Gas assoziiert sind. Alle Objekte haben eine Masse von $M(\text{H}_2) > 100 M_\odot$ bzw. eine Infrarot-Leuchtkraft $L_{\text{IR}} > 100 L_\odot$ und stehen daher mit der Entstehung von Sternen großer Masse in Verbindung. Diese Datenbasis erlaubt erstmals statistische Untersuchungen massereicher Sternentstehungsgebiete im fernen Infrarot jenseits von $100 \mu\text{m}$. Besonders interessant sind dabei Quellen mit zu größerer Wellenlänge ansteigender spektraler Energieverteilung. Große Massen ($M \sim 10^{3\pm 1} M_\odot$) und niedrige Staubtemperaturen ($T \sim 12\text{-}18 \text{ K}$) machen sie zu Kandidaten massereicher Sternentstehungsgebiete in einem frühen Entwicklungsstadium. Um den Entwicklungszustand dieser Objekte zu charakterisieren, wurden (Sub)millimeter-Beobachtungen der Staubkomponente und Radiospektroskopie von Ammoniak durchgeführt. Der Nachweis kalten Staubes und dichten Gases in einer großen Zahl von Objekten belegt den Erfolg der verwendeten Suchmethode. Während die abgeleiteten Säulendichten ähnlich derer bekannter Sternentstehungsgebiete hoher Masse sind, liegen die Gas- und Staubtemperaturen deutlich darunter. Vor allem kompakte Kondensationen, die im mittleren Infrarot nicht nachgewiesen werden konnten und keine Emission warmen Ammoniaks aufweisen, sind ausgezeichnete Kandidaten massereicher Protosterne.

3.1 Einleitung

Es stellt eine Herausforderung dar, Sterne in ihren frühesten Entwicklungsphasen zu entdecken und zu untersuchen. Die Suche nach Protosternen, also Objekten, die den Großteil ihrer Leuchtkraft aus der anfänglichen Kollapsphase beziehen, gehört seit Jahrzehnten zu den aufregendsten Kapiteln der Astrophysik. Heute ist bekannt, daß sich Protosterne tief im Innern von kalten ($T \sim 10 - 20 \text{ K}$) Molekülwolken bilden (Pudritz 2002 und Ward-Thompson 2002). Die Verbindung zu dichter Materie in ihrer Umgebung macht solche Objekte nahezu ausschließlich als kalte Kondensationen im Bereich der Ferninfrarot- und Submillimeter-Wellen sichtbar.

Empfindliche Ferninfrarotmessungen mit IRAS ermöglichten es, durch Messungen der spektralen Energieverteilung junger stellarer Objekte (Lada & Adams 1992) auf die Entwicklung deren zirkumstellarer Umgebung zu schließen. Vor allem die früheste und kurzlebigste Entwicklungsphase in der stellaren Entwicklung, die Ausbildung eines hydrostatischen protostellaren Kerns (Boss & Yorke 1995), ist besonders schwierig zu beobachten. Mit Staubtemperaturen von unter 30 K strahlen derartige Protosterne der Klasse 0 die meiste Energie im Submillimeter-

Bereich ab (André et al. 1993). Erst die Verfügbarkeit empfindlicher Detektoren in diesem Wellenlängenbereich erlaubt es heute, den vollständigen Entwicklungsweg sonnenähnlicher Sterne ($0.1 - 3 M_{\odot}$) in den nahegelegenen Sternentstehungsgebieten zu untersuchen. Die Entwicklung solcher Sterne im Rahmen des Standardmodells der Sternentstehung (Shu et al. 1987) kann damit als größtenteils gesichert angesehen werden.

Es ist dagegen noch weitgehend ungeklärt, inwieweit dieses Modell auf massereiche Sterne ($M \gtrsim 8 M_{\odot}$) angewendet werden kann (Garay & Lizano 1999). Vor allem der starke Strahlungsdruck solcher Objekte scheint ausreichend, die protostellare Akkretion von einem gewissen Punkt an stoppen zu können. Neben protostellarer Akkretion (McKee et al. 2002) und der möglichen Ausbildung einer zirkumstellaren Akkretionsscheibe (Shepherd et al. 2000) sind deshalb auch andere Entstehungsszenarien wie das Verschmelzen masseärmerer Sterne in dichten Haufen (Bonell et al. 1998) denkbar. Obwohl die Gesamtzahl massereicher Sterne nach der stellaren Massenverteilung (Salpeter 1955) nicht besonders hoch ist, haben sie durch ihr hohes Strahlungsfeld eine starke Wechselwirkung mit dem interstellaren Medium. Auf diese Weise beeinflussen sie die Dynamik und Energetik von Galaxien während ihres gesamten Lebenszyklus: In der Frühphase ihrer Entwicklung durch bipolare Ausflüsse (Beuther 2002), im Hauptreihenstadium durch UV-Strahlung und die Ausbildung einer HII-Region, um schließlich am Ende ihres Lebens dem interstellaren Medium als Supernova wieder große Mengen von Energie, Impuls und Materie zurückzugeben.

Es lassen sich zwei wesentliche Gründe für das geringere Wissen über massereiche im Vergleich zu massearmer Sternentstehung ausmachen: Aufgrund ihrer geringen Anzahl gibt es in unmittelbarer Nähe zur Sonne keine Entstehungsgebiete massereicher Sterne. Mit Entfernungen von mehr als 450 pc (Orion Molekülwolke) sind solche Objekte deutlich weiter entfernt als die bekannten Sternentstehungsgebiete massearmer Sterne (Taurus, Chamäleon, Ophiucus). Die Geburt massereicher Sterne in der Umgebung dichter Sternhaufen und verborgen hinter hohen Säulendichten ($A_V > 100$ mag) an Gas und Staub erschwert deren Identifikation und Beobachtung zusätzlich. Zum zweiten nimmt die typische Zeitskala protostellarer Entwicklung (Palla & Stahler 1993) mit zunehmender Masse stark ab.

Über die genauen Anfangsbedingungen, die Anlaß zur Bildung massereicher Sterne geben, ist relativ wenig bekannt. Die früheste heute bekannte Phase in der Entwicklung von Sternen hoher Masse stellen die sogenannten “Hot molecular cores (HMC)” dar, dichte Wolkenkerne aus warmem ($T > 100$ K) molekularem Gas (Kurtz et al. 2000). Bis heute kennt man kein Beispiel für einen massereichen Stern vor dieser HMC-Phase. Zu diesem Zeitpunkt dürfte der physikalische Zustand eines Protosterns hoher Masse noch weitgehend durch die ursprünglichen Bedingungen der ihn umgebenden Molekülwolke charakterisiert sein (Evans et al. 2002). Mit geschätzten Temperaturen von $T \sim 10 - 15$ K liegt das Maximum der spektralen Energieverteilung derartiger Objekte jenseits einer Wellenlänge von $100 \mu\text{m}$.

Das Ziel dieses Kapitels der vorliegenden Arbeit ist es, Objekte in einer solchen Frühphase massereicher Sternentstehung mit Hilfe der ISOPHOT $170 \mu\text{m}$ Zufallsdurchmusterung aufzuspüren. Das Staubkontinuum erlaubt es, Aussagen über das dichte interstellare Medium dieser Quellen zu machen. Die hohe Empfindlichkeit und räumliche Auflösung jenseits der IRAS $100 \mu\text{m}$ Grenze, sowie die gute Himmelsüberdeckung in der galaktischen Ebene sind dafür hervorragend geeignet. Massereiche Sterne entstehen nicht einzeln, sondern zusammen mit Sternen niedrigerer Masse in Gruppen (Testi et al. 1999) oder Haufen (McCaughrean & Stauffer 1994). Im folgenden sollen als solche “Sternentstehungsgebiete” sowohl Objekte bezeichnet werden,

deren bolometrische Leuchtkraft bereits innere Heizung durch entstandene Sterne anzeigt, als auch deren Vorläufer in Form gravitationsgebundener Wolken, deren hohe Massen, Dichten oder Dynamik weiteren Kollaps und zukünftige Bildung von Sternen erwarten lassen. In jedem Fall handelt es sich dabei um kompakte Regionen ($r = 0.2 - 2 \text{ pc}$), die jedoch Teil größerer Strukturen (z.B. Riesenmolekülwolken) sein können.

3.2 Die Suche nach massereichen Protosternen

Die Suche nach kalten ($T \sim 12 \text{ K}$), dichten ($n(\text{H}_2) \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$) und massereichen ($M(\text{H}_2) \sim 1000 M_\odot$) Gebieten in Molekülwolken stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, Regionen zu finden, die geeignete Bedingungen zur Bildung massereicher Sterne bieten. In Anlehnung an den Ausdruck "prä-protostellare Kerne", d.h. gravitationsgebundener Wolkenkerne, die ausreichend Masse aufweisen, um unter ihrer eigenen Schwerkraft zu kollabieren und einen Protostern zu bilden, prägten Evans et al. (2002) für derartige Objekte den Begriff "prästellare Kerne von Sternhaufen", (engl. Pre-Protocluster Cores). Bis heute konnte jedoch noch kein solches Gebilde entdeckt werden.

Den möglichen Grund dafür kann eine Abschätzung dessen Sichtbarkeit für bisherige Instrumente geben: Mit den oben angegebenen Werten und einer Entfernung von 5 kpc (typischer Wert aus Molinari et al. 1996) wäre ein solcher prästellare Haufen-Kern von IRAS mit einer farbkorrigierten Flußdichte von 2.5 Jy im 100 μm Band detektiert und in den drei kürzerwelligen Bändern nicht detektiert worden. Mit einem charakteristischen Radius von $r \sim 1'$ wäre das Objekt damit als eines von 20513 nur bei 100 μm detektierten Objekten im Helligkeitsbereich $1 < F_{100\mu\text{m}} < 3 \text{ Jy}$ im IRAS Punktquellen-Katalog verzeichnet.

Die Detektion der Ferninfrarot-Emission einer IRAS-Quelle und der Nachweis molekularen Gases können als Erkennungsmerkmal eines entfernten Sternentstehungsgebiets gewertet werden. Um die Quelle als außergewöhnlich kalt zu identifizieren, ist zumindest eine weitere Messung im FIR- oder Submm-Kontinuum nötig. Genau diese Aufgabe erfüllt die Zufallsdurchmusterung. Mit einem Fluß von $F_{170\mu\text{m}} \sim 20 \text{ Jy}$ wäre das Objekt leicht in (überdeckten Gebieten) der Zufallsdurchmusterung nachgewiesen worden und könnte aufgrund ihrer hohen räumlichen Auflösung sogar als schwach ausgedehnt charakterisiert werden. Um die Staub- und daraus die Gesamtmasse der Quelle bestimmen zu können und das Objekt eindeutig als prästellare Haufen-Kern einzustufen, muß die Entfernung bekannt sein. Dies kann gut anhand der Kinetik aus radiospektroskopischen Beobachtungen der zugehörigen Gaskomponente erfolgen.

Viele der bisher bekannten protostellaren Objekte mittlerer und hoher Masse wurden während Nachfolgeuntersuchungen im Feld von IRAS-Quellen entdeckt (z.B. Shepherd et al. 2000, Cesaroni et al. 1997, Molinari et al. 1998, Beuther 2002). Diese Quellen wurden oftmals auf Grundlage verschiedener Kriterien von Ferninfrarot-Farben und -Flußdichten ausgewählt. Ein Beispiel stellen die wohldefinierten Ferninfrarot-Farben bekannter ultrakompakter HII-Regionen dar. Nach Wood & Churchwell (1989) können damit solche Objekte allein auf Grundlage ihrer Ferninfrarot-Farben ausgewählt werden. Modifizierte Flußkriterien im fernen Infrarot wurden z.B. von Palla et al. (1991,1993) und Sridharan et al. (2002) verwendet. Auf diese Stichprobe bauen eine Anzahl weiterer Arbeiten auf (z.B. Molinari et al. 1998). Schreyer et al. (1996) verwendet eine flußlimitierte Stichprobe der hellsten IRAS-Quellen bei 100 μm . Allen diesen Verfahren ist gemeinsam, daß durch die gewählten Kriterien Objekte gefunden werden sollen, in

denen bereits massereiche Sternentstehung stattgefunden hat. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit erhöht, in der Haufenumgebung weitere massereiche Objekte in noch früheren Entwicklungszuständen zu finden. Die Entdeckung einiger der bekannten “Hot molecular cores” in der Umgebung ultrakompakter HII-Regionen durch Churchwell et al. (1990) zeigten die Gültigkeit des Ansatzes. Die Methode scheint jedoch nicht geeignet zur Charakterisierung des ursprünglichen Zustandes von Gas und Staub vor der ersten Phase der Sternentstehung.

Maser-Quellen können ebenfalls auf junge massereiche Sterne hindeuten. H₂O-Maser (Comoretto et al. 1990, Brand et al. 1994)) weisen auf die dichte ($10^8 - 10^9 \text{ cm}^{-3}$), mehrere hundert Kelvin heiße Umgebung leuchtkräftiger eingebetteter Sterne hin und werden möglicherweise durch Schocks als Folge von Ausflüssen erzeugt. Eine kürzlich entwickelte Methode ist die Suche nach Dunkelwolken im mittleren Infrarot, die auf $8 \mu\text{m}$ Karten der Satellitenmission MSX bemerkt worden sind (Egan et al. 1998), die sogenannten “MSX Dark Clouds”. Ähnliche Objekte wurden auch bei Kartierungen der galaktischen Ebenen im mittleren Infrarot mit ISO (Teyssier et al. 2002) entdeckt. Eine solche MIR-Absorption deutet auf hohe Säulendichten des Staubes hin. Nachfolgeuntersuchungen (Carey et al. 1998, Carey et al. 2000) ergaben, daß solche Wolken tiefe Staub- bzw. Gastemperaturen und hohe Massen aufweisen können. Die zur Studie verwendeten Moleküllinien ließen jedoch alternative Deutungen zu (Lis et al. 2001). Die Methode benötigt darüberhinaus eine ausreichend helle Hintergrundemission, um genügend Kontrast zu den davor befindlichen Dunkelwolken herzustellen.

3.3 Kreuzkorrelation mit Moleküllinien-Durchmusterungen

Die durchgeführten Abschätzungen zeigten, daß unter kompakten und kalten Ferninfrarot-Quellen ausgezeichnete Kandidaten galaktischer Sternentstehungsgebiete in einem frühen Entwicklungszustand zu erwarten sind. Entscheidend für deren Identifikation in der Zufallsdurchmusterung ist jedoch die effiziente Abgrenzung gegenüber Objektklassen mit ähnlichen spektralen Energieverteilungen im fernen Infrarot. Die niedrige Skalenhöhe der galaktischen Verteilung ultrakompakter HII-Regionen (Wood & Churchwell 1989) läßt eine solche ebenfalls für deren Entwicklungsvorläufer erwarten. Bei einer Entfernung von einigen kpc befindet sich daher die überwiegende Mehrzahl aller massereichen Sternentstehungsgebiete in unmittelbarer Nähe zum galaktischen Äquator ($|b| < 5^\circ$). Da in der galaktischen Ebene auch die Säulendichte des im allgemeinen interstellaren Medium verteilten Staubes ihr Maximum erreicht, tritt hier im Infrarotbereich besonders starke Konfusion durch kompakte Kondensationen auf. Im Rahmen der IRAS-Mission entdeckt, zeichnen sich solche Knoten durch ein kaltes Ferninfrarot-Spektrum aus. Durch Studien im Rahmen der COBE- und ISO-Mission weiß man, daß die kalte Komponente großer Staubkörner im verteilten interstellaren Medium eine bemerkenswert einheitliche Temperatur von etwa $18 \pm 2 \text{ K}$ hat. Beimengungen kleiner Staubteilchen, die jedoch nicht im thermischen Gleichgewicht sind, führen zu einer zusätzlichen Emission bei einer Wellenlänge $\lambda \lesssim 60 \mu\text{m}$, wobei das typische Flußverhältnis $F_{100\mu\text{m}}/F_{60\mu\text{m}}$ ca. 10 beträgt (Désert et al. 1990).

Aufgrund seiner niedrigen Temperatur stellt der interstellare Zirkus eine beträchtliche Kontaminationsquelle kalter ($T \sim 18 \text{ K}$) Punktquellen in der Zufallsdurchmusterung dar. Dabei ist zu bedenken, daß die Säulendichten in einzelnen kompakten Zirkusknoten nicht besonders hoch sind. Viele dieser Quellen befinden sich bei hohen galaktischen Breiten und konnten von der IRAS-Mission oftmals nur im $100 \mu\text{m}$ Band detektiert werden. Helle Zirkusquellen sind in der Regel besonders nahe und oft durch Streuung blauen Umgebungslichtes als diffuse Nebel zu

identifizieren (Paley et al. 1991).

Massereiche Sternentstehungsgebiete, die ihre Infrarotleuchtkraft aus einer kalten Staubkomponente erhalten, müssen jedoch notwendigerweise mit (dichtem) molekularem Gas assoziiert sein. Mit hoher Zuverlässigkeit läßt sich anhand der Stärke und Kinematik dieses Gases zwischen einem nahen Zirkusknoten und einem entfernten kalten Sternentstehungsgebiet unterscheiden.

Für die hier durchgeführte Untersuchung ist es von großem Vorteil, daß im Verlauf der letzten zwei Jahrzehnte mehrere relevante radiospektroskopische Himmelsdurchmusterungen der Linienemission der Moleküle CO und CS durchgeführt worden sind. Diese Messungen wurden im Rahmen großflächiger galaktischer Durchmusterungen erhalten. (Heyer et al. 1998, Lee et al. 2001, Brunt et al. 2003) und großer Beobachtungsprogramme von IRAS-Punktquellen (Casoli et al. 1986, Wilking et al. 1989, Wouterloot & Brand 1989, Reach et al. 1993, Bronfman et al. 1996, Yang et al. 2002,).

Um das mit kompakten Quellen assoziierte molekulare Gas von ausgedehnter Umgebungsemission unterscheiden zu können, muß gewährleistet sein, daß die räumlichen Auflösungen von Moleküllinien- und Ferninfrarotbeobachtungen übereinstimmen. Alle hier verwendeten Durchmusterungen sind an Teleskopen mit mehr als 5m Durchmesser durchgeführt worden, die bei den verwendeten Frequenzen von 110 und 115 GHz (CO) sowie 98 GHz (CS) Hauptkeulendurchmesser zwischen 20'' und 120'' und damit eine der Zufallsdurchmusterung vergleichbare räumliche Auflösung besitzen.

Damit ergeben sich die folgenden Auswahlkriterien für Sternentstehungsgebiete in der Zufallsdurchmusterung:

1. Kompakte ISOSS-Quelle (Gauss'sche Halbwertsbreite $1.2' < FWHM < 3.5'$), detektiert in allen 4 Kamerapixeln (Signal-zu-Rausch-Verhältnis > 5).
2. Assoziierte IRAS 100 μm -Punktquelle in $< 3'$ Abstand.
3. Emission von molekularem Gas ($^{12}\text{CO}(1-0)$, $^{13}\text{CO}(1-0)$ oder $\text{CS}(2-1)$) in $< 3'$ Abstand.

Kriterium (1) entspricht bei einer durchschnittlichen Entfernung von 5 kpc einem Objektdurchmesser < 1.8 pc, was die typische Größe von Kondensationen molekularen Gases in massereichen Sternentstehungsgebieten ist (Brand et al. 2001). Kriterium (2) erlaubt die Bestimmung der Farbtemperatur. Die unabhängige Detektion der Ferninfrarot-Quelle durch IRAS erhöht darüberhinaus die Zuverlässigkeit des Quellenkatalogs. Durch die weite galaktische Verteilung von ^{12}CO können beim Kriterium (3) für eine gegebene Quelle mehrere Emissionskomponenten auftreten. Zur Bestimmung der wahrscheinlichsten Linien-Assoziation wurden in den verwendeten Durchmusterungen verschiedene Methoden angewendet. Aufgrund ihrer niedrigeren Linienopazität bzw. höheren kritischen Dichte sind ^{13}CO und CS bessere Indikatoren für solche massereichen Gebiete. Im Falle der Bell ^{13}CO -Durchmusterung (Lee et al. 2001) konnte die wahrscheinlichste Linienassoziation aus der Kartierung der CO-Verteilung um die Ferninfrarot-Quellen abgeleitet werden. Der im Rahmen dieser Arbeit aus den unterschiedlichen Datensätzen zusammengestellte radiospektroskopische Eingabekatalog umfaßt mehr als 15000 Einzelobjekte mit verfügbaren Molekülliniendaten.

Insgesamt konnten 253 Quellen durch die Kreuzkorrelation gefunden werden. Von diesen haben 193 eine Leuchtkraft $F_{\text{FIR}} > 100 L_{\odot}$ oder eine Gesamtmasse $M > 100 M_{\odot}$ und stehen

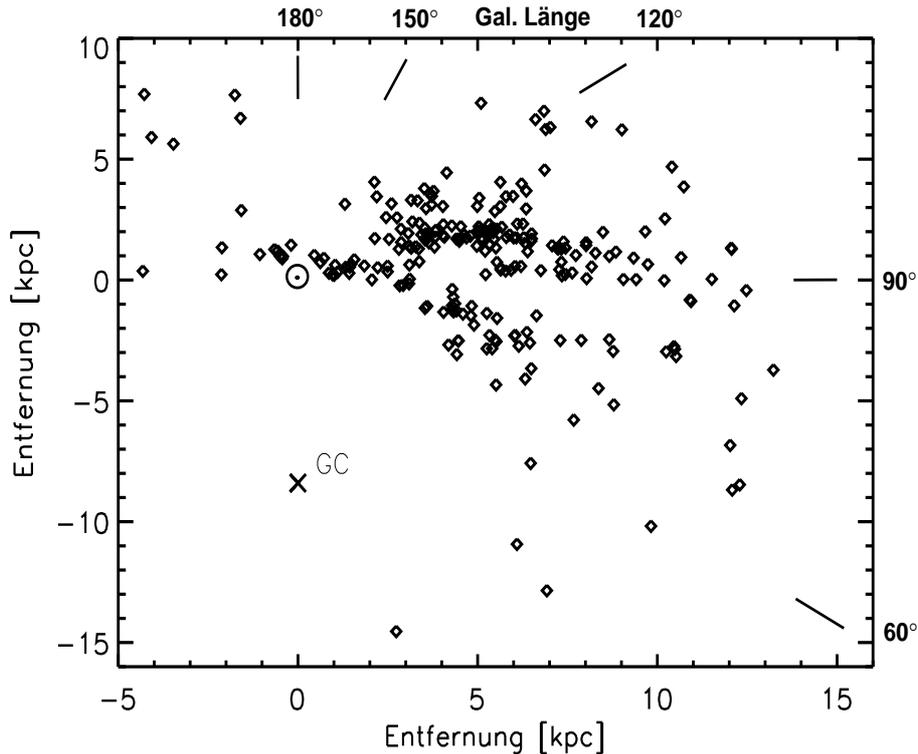


Abbildung 3.1: Verteilung der Sternentstehungsgebiete, projiziert auf die galaktischen Ebene. Aufgetragen ist die Entfernung von der Sonne in kartesischen Koordinaten. Das Galaktische Zentrum ist durch ein Kreuz gekennzeichnet. Die kinematischen Entfernungen wurden nach Brand & Blitz (1993) berechnet. Ein großer Teil der Objekte ist in zwei Regionen angeordnet, die dem Lokalen (unten) und dem Perseus-Spiralarm (oben) unserer Milchstraße entsprechen. Die geringere Zahl von Quellen bei einer galaktischen Länge $< 60^\circ$ lässt sich auf Sättigung der Ausleseelektronik zurückführen. Im Längenbereich $130^\circ < l < 360^\circ$ ist die Zahl durchgeführter Moleküllinienmessungen gering.

daher mit der Entstehung massereicher Sterne in Verbindung, wobei die gewählten Werte eine Abgrenzung zu großen Globulen darstellen.

Im folgenden sollen zunächst die Ferninfrarot-Eigenschaften aller in der Kreuzkorrelation gefundenen Quellen untersucht werden, um damit die besonders interessanten, kältesten Objekte ermitteln zu können.

3.4 Eigenschaften der Sternentstehungsgebiete

3.4.1 Entfernungen und galaktische Verteilung

Abb. 3.1 zeigt die Verteilung der Quellen projiziert auf die Galaktische Ebene. Die kinematische Entfernungen wurden aus den Radialgeschwindigkeiten aller Objekte mit Hilfe des galaktischen Rotationsmodells von Brand & Blitz (1993) berechnet. Dies gelang eindeutig in nahezu allen Fällen. Für 29 Objekte innerhalb des Umlaufradius der Sonne gab es zwei Lösungen der kinematischen Entfernung. In vielen Fällen war es durch Hinzunahme weiterer Daten möglich, zwischen beiden zu entscheiden. So wurde etwa die von Herbst & Sawyer (1981) entwickelte Methode zur Bestimmung einer Mindestentfernung zum Objekt aus der beobachteten Flächen-

dichte von Vordergrundsternen angewendet (z.B. bei 19309+2020). Objekten mit im Rahmen des Rotationsmodells nicht erlaubter Geschwindigkeit wurde die korrespondierende Tangentialgeschwindigkeit zugeordnet (z.B. bei 19557+2825). Im Bereich des galaktischen Antizentrums und in Bereichen der Milchstraße im Schwan traten aufgrund sehr kleiner Geschwindigkeitsgradienten große Unsicherheiten bei der Entfernungbestimmung auf. Hier konnten teilweise kinematisch assoziierte Molekülwolkenkomplexe identifiziert und deren Entfernung zugeordnet werden (z.B. bei 05337+3031).

Abb. 3.1 zeigt die Verteilung der Quellen projiziert auf die Galaktische Ebene und verdeutlicht, daß sich ein großer Teil der Objekte auf den Lokalen und den Perseus-Spiralarm verteilt. In Abb. 3.2a ist ein Histogramm der Entfernungsverteilung dargestellt. Die mittlere Entfernung beträgt 5.9 kpc.

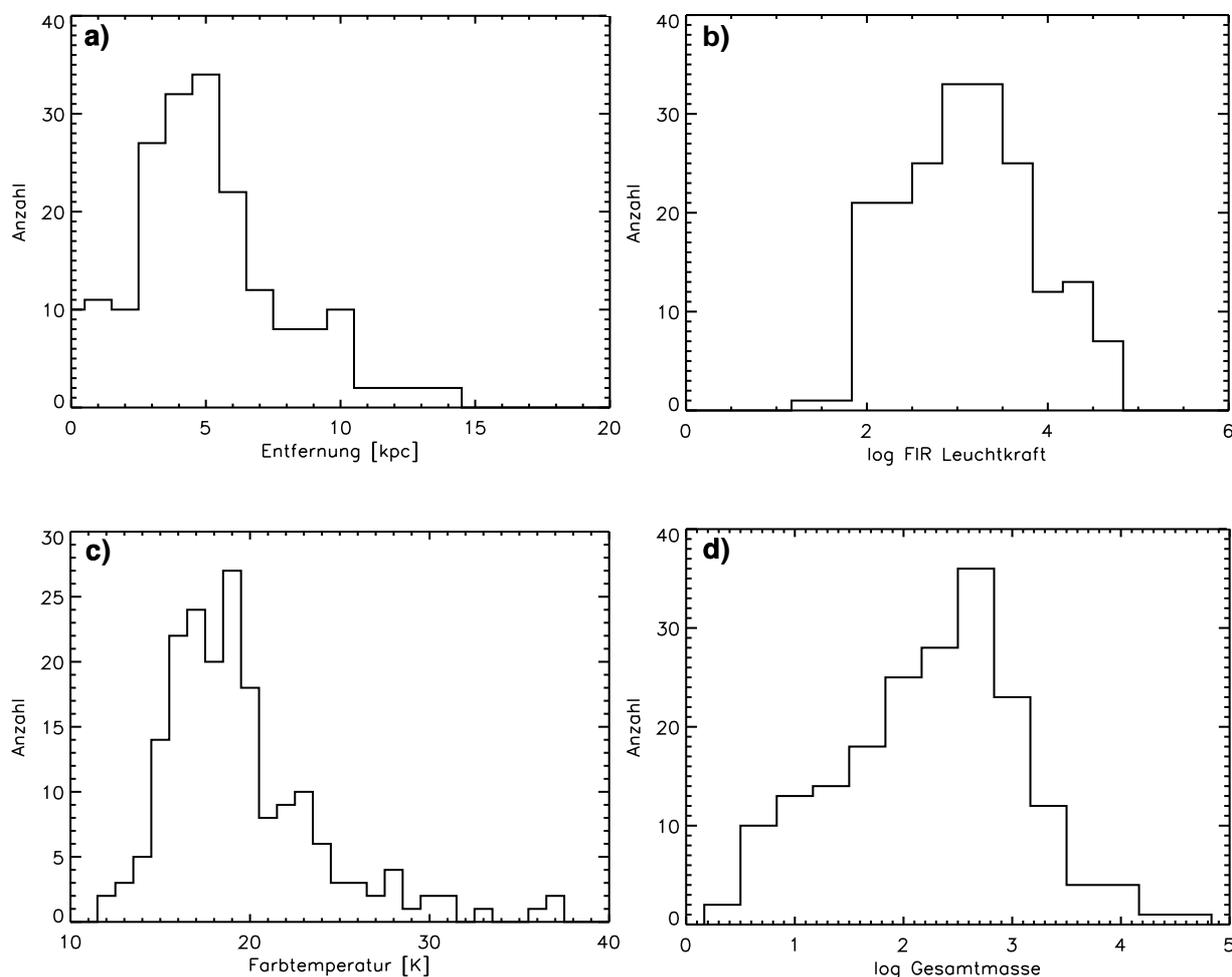


Abbildung 3.2: Eigenschaften aller 193 in der Zufallsdurchmusterung identifizierten massereichen Sternentstehungsgebiete. a) Verteilung der Entfernung bestimmt aus der Radialgeschwindigkeit der assoziierten Gaskomponente und dem galaktischen Rotationsmodell von Brand & Blitz 1993, b) Verteilung der Ferninfrarot-Leuchtkräfte $F_{12-240\mu\text{m}}$, bestimmt aus ISOSS und IRAS, c) Farbtemperatur abgeleitet aus $F_{170\mu\text{m}}/F_{100\mu\text{m}}$ und d) aus der Staubmasse abgeleitete Gesamtmassen der Objekte.

3.4.2 Leuchtkräfte

Die bolometrischen Infrarot-Leuchtkräfte L_{IR} der Quellen wurden berechnet mit

$$L_{\text{IR}} = 4\pi d^2 F \quad [\text{W}] \quad (3.1)$$

wobei der gesamte Strahlungsfluß F im Infraroten durch die Flußdichten F_λ von IRAS und ISOSS gegeben ist

$$F = \left(2.21 \frac{F_{12\mu\text{m}}}{\text{Jy}} + 0.87 \frac{F_{25\mu\text{m}}}{\text{Jy}} + 0.45 \frac{F_{60\mu\text{m}}}{\text{Jy}} + 0.18 \frac{F_{100\mu\text{m}}}{\text{Jy}} + 0.11 \frac{F_{170\mu\text{m}}}{\text{Jy}} \right) 10^{-13} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Gleichung 3.1 basiert auf dem Ausdruck von Casoli et al. (1986). Der letzte Term stellt eine hier eingeführte Erweiterung für das neue 170 μm Band der Zufallsdurchmusterung dar. Mit dem dort verwendeten Breitbandfilter von 90 μm Bandbreite wird der Wellenlängenbereich bis 240 μm ausgedehnt. Gleichung 3.1 schließt damit das wichtige Maximum der Staubemission für $T > 14$ K ein. Diese Erweiterung ist mit einer Genauigkeit von ~ 20 % für Staubtemperaturen zwischen 10 K und 30 K sowie $0 < \beta < 2$ gültig. Abb. 3.2b zeigt die Verteilung der Leuchtkräfte, deren Maximum im Bereich 1000-2000 L_\odot liegt.

3.4.3 Flußverhältnisse und Farbtemperaturen

Um die thermische Staubemission im FIR zu charakterisieren und Hinweise auf die Natur der dominierenden Staubkomponente zu erhalten, wurden die Flußverhältnisse $F_{170\mu\text{m}}/F_{100\mu\text{m}}$ und $F_{100\mu\text{m}}/F_{60\mu\text{m}}$ aller in der Kreuzkorrelation gefundenen Objekte in einem Zweifarbanddiagramm (Abb. 3.3) gegeneinander aufgetragen. Im Wellenlängenbereich von 50 - 240 μm tritt thermische Emission von mindestens zwei wichtigen Staubkomponenten auf: Verhältnismäßig warme kleine Staubpartikel (VSG = Very Small Grains) und große Staubkörner niedriger Temperatur, die sich im Strahlungsgleichgewicht mit der Umgebung befinden.

Wie Abb. 3.3 zeigt, weist die Mehrzahl der Objekte einen 170 μm -Exzeß über der aus dem Verhältnis $F_{100\mu\text{m}}/F_{60\mu\text{m}}$ bestimmten Farbtemperatur auf. Dies bedeutet, daß die Flüsse bei 60 μm , 100 μm und 170 μm nicht mit einem modifizierten Schwarzkörperspektrum nur einer Temperatur beschrieben werden können und bestätigt das Vorhandensein wenigstens zweier Staubkomponenten.

Der Bereich zwischen den grünen Geraden in Abb. 3.3 berücksichtigt den Beitrag einer verteilten Komponente kleiner Staubpartikel zum 60 μm Fluß einer dominierenden, kalten (optisch dünnen) Staubkomponente großer Staubkörner mit Emissivitätsindex $\beta = 2$. Der Anteil an der 60 μm Emission entspricht dem von Dunkelwolken mit einer mittleren visuellen Extinktion von $A_V = 1...5$ mag (Désert et al. 1996). Eine weiterer Beitrag zum 60 μm Fluß ist durch warmen zirkumstellaren Staub protostellarer Quellen möglich, die in den großen Aperturen der IRAS- und ISOSS-Messungen nicht aufgelöst sind.

Zur Beschreibung der spektralen Energieverteilung massereicher Sternentstehungsregionen im Ferninfrarot- und Submillimeter-Bereich, beim Auftreten einer dominierenden ultrakompakten HII-Region (Churchwell 2002), wurden vielfach Staubmodelle hoher optischer Tiefe ($\tau_{100\mu\text{m}} \gtrsim 1$) verwendet (Hatchell et al. 2000, Chini et al. 1987). Wie zu sehen ist, weist die Farbverteilung der Objekte im Diagramm nicht auf das bevorzugte Auftreten des optisch dicken Falls hin (obere

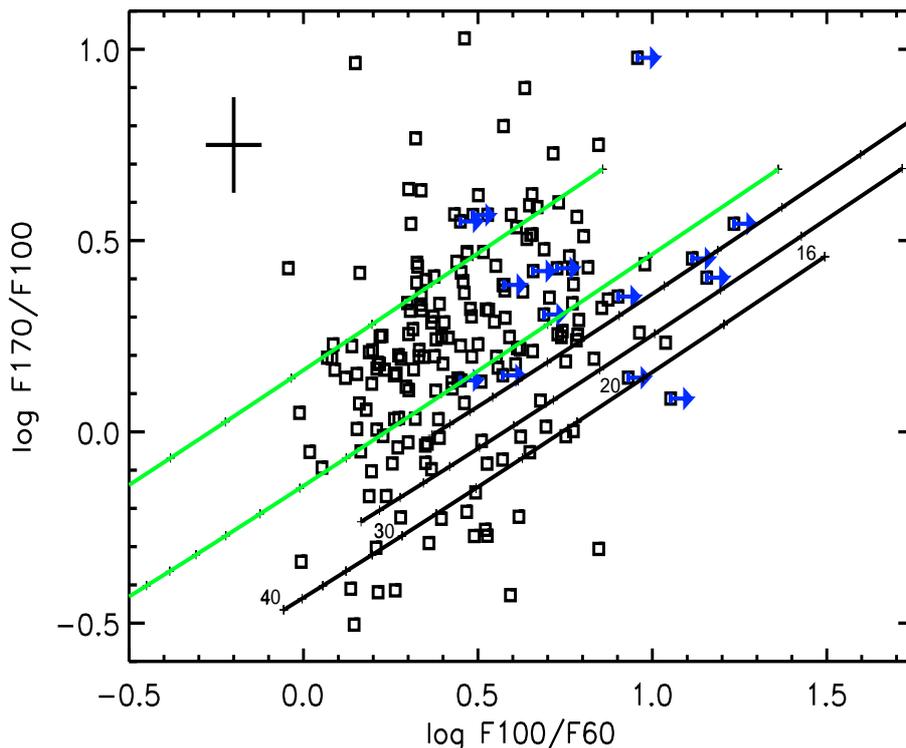


Abbildung 3.3: Zweifarbenendiagramm der massereichen Sternentstehungsgebiete der Zufallsdurchmusterung. Aufgetragen sind die Logarithmen der Flußverhältnisse $F_{170\mu\text{m}}/F_{100\mu\text{m}}$ bzw. $F_{100\mu\text{m}}/F_{60\mu\text{m}}$. Mit einem blauen Pfeil gekennzeichnete Objekte weisen bei $60\mu\text{m}$ eine obere Flußgrenze auf. Die unteren beiden schwarzen Geraden zeigen die Eigenfarben modifizierter Schwarzer Körper mit Emissivitätsindizes von $\beta = 2$ (unten) bzw. $\beta = 1$ (Mitte). Die zugehörige Farbtemperatur ist für den Fall $\beta = 2$ angegeben. Die obere schwarze Gerade ($\beta = 0$) entspricht dem Grenzfall hoher optischer Tiefe ($\tau_{100\mu\text{m}} > 1$). Eine Vielzahl der ISOSS-Quellen weist keine isotherme Emission auf und ist durch einen starken $170\mu\text{m}$ -Exzeß gekennzeichnet. Die typische Ferninfrarot-Emission von Dunkelwolken entspricht dem Bereich zwischen den beiden grünen Geraden. Sie berücksichtigen den Einfluß kleiner Staubpartikel (VSG) auf die $60\mu\text{m}$ Emission und sind für mittlere visuelle Extinktionen von $A_V = 1\text{ mag}$ (untere grüne Linie) und $A_V = 5\text{ mag}$ (obere grüne Linie) gezeichnet. Das Kreuz bezeichnet den Fehler (1σ) in der Farbbestimmung der ISOSS-Quellen.

schwarze Gerade). Für die weitere Analyse wird deshalb davon ausgegangen, daß die Emission bei $100\mu\text{m}$ und $170\mu\text{m}$ im wesentlichen durch optisch dünne Strahlung kalten Staubes mit einem Emissivitätsindex $\beta = 2$ hervorgerufen wird.

Damit kann aus dem Flußverhältnis von $F_{\lambda_1=170\mu\text{m}}/F_{\lambda_2=100\mu\text{m}}$ die Farbtemperatur T_c der kalten Staubkomponente berechnet werden.

$$F_{\lambda_1}/F_{\lambda_2} = \lambda_2^{3+\beta} (e^{hc/kT_c\lambda_2} - 1) / \lambda_1^{3+\beta} (e^{hc/kT_c\lambda_1} - 1), \quad (3.2)$$

Die Verteilung der Farbtemperaturen ist in Abb. 3.2c dargestellt. Ein ausgeprägtes Maximum tritt im Temperaturbereich $T = 16\text{--}19\text{ K}$ auf. Dies entspricht der Farbtemperatur des Staubes im Infrarot-Zirrus (Lagache et al. 1998), der vom allgemeinen interstellaren Strahlungsfeld erwärmt wird. Eine solch niedrige Durchschnittstemperatur des Staubes ist für die hier untersuchten Objekte mit verhältnismäßig hoher Leuchtkraft überraschend. Während die Farbtem-

peratur von 30 % der Objekte auf wärmeren Staub ($20 \text{ K} < T < 40 \text{ K}$) hinweist, sind 70 % von kaltem Staub ($T < 20 \text{ K}$) mit Temperaturen bis hinunter zu 12 K dominiert. Mit dem abgeleiteten relativen Fehler im $170 \mu\text{m}$ von 15 % und typischen Fehlern der IRAS $100 \mu\text{m}$ Flüsse von 10 % ergibt sich im vorliegenden Temperaturbereich für die einzelnen Objekte ein Fehler in der Farbtemperatur von $\Delta T = \pm 2 \text{ K}$.

Die gefundene mittlere Staubtemperatur der bei $170 \mu\text{m}$ selektierten ISOSS-Quellen liegt mit $\bar{T} = 19 \pm 6 \text{ K}$ deutlich niedriger als Werte anderer Studien massereicher Sternentstehungsgebiete. Die aus IRAS-Photometrie in Kombination mit Submillimeter-Messungen abgeleiteten Vergleichswerte betragen $\bar{T} = 32 \pm 5 \text{ K}$ bei Molinari et al. (2000), $\bar{T} = 35 \pm 6 \text{ K}$ bei Hunter et al. (2000) und $\bar{T} = 43 \pm 8 \text{ K}$ bei Sridharan et al. (2002).

3.4.4 Staubmassen aus den Ferninfrarot-Messungen

Nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz befindet sich das Strahlungsmaximum der kalten Komponente mit einer durchschnittlichen Temperatur von $T \sim 17.5 \text{ K}$ bei einer Wellenlänge von $\lambda = 160 \mu\text{m}$. Dies liegt zentral im verwendeten Breitbandfilter der Zufallsdurchmusterung (siehe Abb. 1.4). Da die abgeleitete Gesamtmasse des emittierenden Staubes stark von der Staubtemperatur abhängt, sind die ISOSS-Daten sehr wichtig zur Massebestimmung.

Nach Hildebrand (1983) folgt die Masse emittierenden Staubes M_d aus

$$M_d = \frac{d^2 F_\lambda}{\kappa_\lambda B_\lambda(T_d)} \quad (3.3)$$

wobei d die Entfernung zur Quelle, B die Planck'sche Strahlungsfunktion und κ die Opazität des Staubes bezeichnet. Der benutzte Wert $\kappa_{170\mu\text{m}} = 25 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ tritt nach Ossenkopf & Henning (1994) in dichten protostellaren Kernen auf. Kürzlich im Submillimeter-Bereich durchgeführte Untersuchungen der Staubopazität in Dunkelwolken (Bianchi et al. 2003) bestätigen den verwendeten Wert.

Die berechneten Staubmassen erlauben die Berechnung der Gesamtmasse M der Sternentstehungsgebiete unter der Voraussetzung eines bekannten Massenverhältnisses von Gas zu Staub. Dazu wurde nach Sodroski et al. (1997) ein durchschnittliches galaktisches Gas-zu-Staub-Massenverhältnis von 150 verwendet. Abb. 3.2d zeigt die Verteilung der so erhaltenen Gasmassen, die ein Maximum bei $M \sim 500 M_\odot$ aufweist.

Neben systematischen Fehlern in der Staubopazität und dem Gas-zu-Staub-Verhältnis dominiert vor allem die Genauigkeit der Temperaturbestimmung den Gesamtfehler der Masse. Der ermittelte Fehler der Farbtemperatur von $\Delta T = \pm 2 \text{ K}$ führt bei einer durchschnittlichen Temperatur von $T = 19 \text{ K}$ zu einem typischen relativen Fehler in der Masse von $\frac{\Delta M}{M} \sim 50\%$.

Abb. 3.4a zeigt ein Masse-Leuchtkraft-Diagramm aller bei $170 \mu\text{m}$ identifizierten Sternentstehungsgebiete. Da im Wellenlängenbereich $\lambda > 100 \mu\text{m}$ große Staubteilchen mit einem Emissivitätsindex $\beta = 2$ die thermische Emission dominieren, hängt die nahe des Strahlungsmaximums aus Gleichung (3.3) bestimmte Masse stark von der Temperatur ab. Dies zeigt die farbliche Kodierung der Objekte in Abb. 3.4a: Die kältesten Objekte (blau) mit einem Flußverhältnis $F_{170\mu\text{m}}/F_{100\mu\text{m}} > 2$ weisen aufgrund der entsprechend niedrigen Staubtemperatur $T < 18 \text{ K}$ eine bezogen auf die Leuchtkraft besonders hohe Masse auf.

Um die Entwicklung von Masse und Leuchtkraft während des Sternentstehungsprozesses zu un-

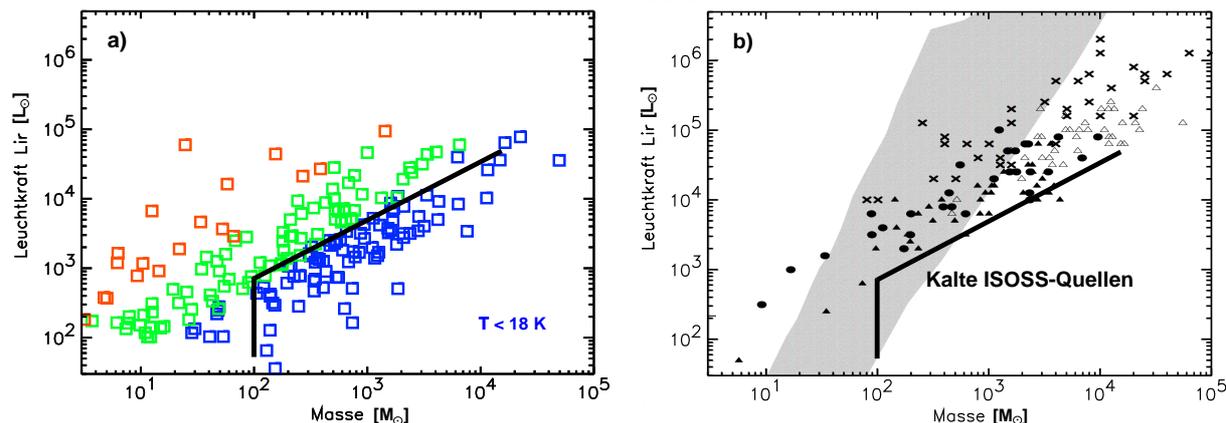


Abbildung 3.4: a) Masse-Leuchtkraft-Diagramm der Sternentstehungsgebiete in der Zufallsdurchmusterung. Die Farbtemperatur T der Quellen ist farblich kodiert (Blau: $T < 18$ K, Grün: $18 K < T < 25$ K, Rot: $T > 25$ K). b) Masse-Leuchtkraft-Diagramm bekannter massereicher protostellarer Objekte (HMPOs = High Mass Protostellar Objects) nach Sridharan et al. (2002). HMPOs sind durch Kreise (bei zweideutiger Entfernung durch Dreiecke) gekennzeichnet. Kreuze markieren ultrakompakte HII-Regionen aus Hunter et al. (2000). Schwarz umrandet ist in beiden Diagrammen der Bereich der kalten massereichen ISOSS-Quellen.

tersuchen, ist es aufschlußreich, die kalten ISOSS-Quellen mit anderen frühen Entwicklungsstadien massereicher Sterne zu vergleichen. Abb. 3.4b zeigt das entsprechende Masse-Leuchtkraft-Diagramm für radioleise massereiche protostellare Objekte (HMPOs = High Mass Protostellar Objects) aus Sridharan et al. (2002) und radiolaute ultrakompakte HII-Regionen (UCHII) aus Hunter et al. (2000). Die Massenbestimmung erfolgte dabei aus (Sub)millimeterbeobachtungen in Verbindung mit IRAS-Photometrie. HPMOs werden als Entwicklungsvorläufer der ultrakompakten HII-Regionen (UCHII) angesehen. Wie der schwarz umrandete Bereich in Abb. 3.4a+b zeigt, weisen die kalten ISOSS-Quellen mit $T < 18$ K keine Überlagerung mit bekannten Objekten auf und besitzen niedrigere Leuchtkräfte für eine gegebene Masse. Die höhere Leuchtkraft von HMPOs und besonders UHCIIIs kann als Entwicklungseffekt gedeutet werden: Einsetzende Sternentstehung führt zur Stauberwärmung in den jungen stellaren Objekten. Durch Strahlungs- und Impulseintrag in das umgebende Medium wird dieses zunehmend erwärmt und schließlich verteilt.

Als Indikator für den Entwicklungszustand kann demnach das Masse-zu-Leuchtkraft-Verhältnis M/L angesehen werden. Während UHCIIIs durch Werte von $M/L \sim 0.01 M_{\odot}/L_{\odot}$ charakterisiert sind, weisen radioleise HPMOs $M/L \sim 0.05 M_{\odot}/L_{\odot}$ auf. Für die kalten ISOSS-Quellen gilt $M/L \sim 0.63 M_{\odot}/L_{\odot}$. Noch höhere Werte von bis zu $M/L \sim 10 M_{\odot}/L_{\odot}$ können in vom interstellaren Strahlungsfeld geheizten Wolken ohne aktive Sternentstehung auftreten (siehe z.B. Lee et al. 1996). Wie der markierte Bereich in Abb. 3.4b zeigt, wurden Objekte mit den Eigenschaften kalter ISOSS-Quellen bei den bisherigen Untersuchungen der Frühstadien massereicher Sternentstehung nicht berücksichtigt.

Um die Eigenschaften dieser neuen Klasse von Objekten genauer zu untersuchen, wurden bodengebundene Nachfolgebeobachtungen einer Stichprobe von 35 Objekten durchgeführt. Diese erlaubten das Studium der Staubkomponente mit hoher räumlicher Auflösung und die Verifikation der niedrigen Temperaturen durch Ammoniak-Messungen des mit den Objekten assoziierten dichten Gases.

3.5 (Sub)millimeter-Beobachtungen des Staubes

Für die Staubkomponente sind dafür Beobachtungen im (Sub)millimeter-Kontinuum mit Wellenlängen zwischen $450 \mu\text{m}$ und 1.2 mm aus mehreren Gründen besonders geeignet:

- Submillimeter-Messungen im Rayleigh-Jeans-Bereich der spektralen Energieverteilung in Verbindung mit dem Emissionsmaximum (ISOSS) und dem Wien'schen-Teil (IRAS) erlauben eine präzise Bestimmung von Staubtemperatur und -emissivität.
- Die thermische Emission von Staub ist im Submillimeter-Bereich bis zu hohen Säulendichten von $\sim 10^{25} \text{ cm}^{-2}$ optisch dünn und daher am besten zur Massenbestimmung geeignet.
- Beobachtungen mit den leistungsfähigsten (Sub)millimeter-Kameras an großen Radioteleskopen (JCMT, IRAM 30m-Teleskop) erlauben eine hohe räumliche Auflösung ($7''$ - $22''$ FWHM entsprechend 0.2 - 0.6 pc bei 5 kpc) und damit die Untersuchung der Morphologie der Punktquellen im fernen Infrarot.

Beobachtungen mit der Bolometerkamera SCUBA (Holland et al. 1999) wurden am James-Clerck-Maxwell Telescope (JCMT) auf dem Mauna Kea (Hawaii) am 28. und 29. Juli 2001 sowie vom 17.-19. Mai 2003 erhalten. Die Beobachtungen konnten bei sehr guter und stabiler atmosphärischer Transmission ($\tau_{850\mu\text{m}} = 0.185 \pm 0.01$) durchgeführt werden. Die Kamera erlaubt die gleichzeitige Beobachtung bei den Wellenlängen 450 und $850 \mu\text{m}$. Dazu werden in SCUBA zwei Bolometer-Arrays in Verbindung mit einem dichroischen Strahlteiler gleichzeitig verwendet. Die Messungen geschahen im für kompakte Quellen geeigneten, sogenannten "Jiggle"-Modus. Dabei fährt der Sekundärspiegel des Teleskops 64 einzelne Positionen an, um die mit den Empfängern nur teilweise abgedeckte Fokalebene der Kamera vollständig abzutauchen. Die typische Beobachtungszeit pro Quelle betrug 30 min . Die atmosphärische Transmission wurde aus Skydips und Radiometer-Messungen am JCMT und CSO bestimmt. Mars, Uranus und CRL618 dienten als Kalibrationsquellen. Die Messungen wurden mit dem Programmpaket SURF (SCUBA User Reduction Facility, Jenness & Lightwood 1998) ausgewertet, das Prozeduren zur Reduktion von korreliertem Himmelsrauschen beinhaltet. Die aus den Kalibrationsmessungen abgeleitete photometrische Genauigkeit beträgt 25% bei $450 \mu\text{m}$ und 20% bei $850 \mu\text{m}$. Die gemessene Gauss'sche Halbwertsbreite des zentralen Maximums der Punktbildfunktion ist $7.9''$ bei $450 \mu\text{m}$ und $14.9''$ bei $850 \mu\text{m}$, bestimmt durch Messungen des für SCUBA unaufgelösten protoplanetaren Nebels CRL 618.

Kontinuum-Beobachtungen bei 1.2 mm Wellenlänge erfolgten am 9. und 11. Juni 2001 mit dem IRAM 30m-Teleskop auf Pico Veleta (Spanien) mit der 37-Kanal Bolometer-Kamera MAMBO (Kreysa et al. 1998). Da am IRAM 30m-Teleskop kein vollbeweglicher Sekundärspiegel zur Verfügung steht, wurden Messungen an 8 Raster-Positionen durchgeführt, um eine ausreichende Überdeckung der Bildebene zu erreichen. Dieser Modus wurde aufgrund der verhältnismäßig schlechten und variablen atmosphärischen Transmission ($\tau_{1.2 \text{ mm}} \sim 0.6$) während der Beobachtungen gewählt und ermöglichte ein höheres Signal-zu-Rausch-Verhältnis als übliche Kartierungsverfahren. Kalibrationsmessungen wurden mit Hilfe des photometrischen Standards K30A erhalten. Die Auswertung der Daten erfolgte mit dem Programmpaket NIC, die photometrische Genauigkeit beträgt 30% .

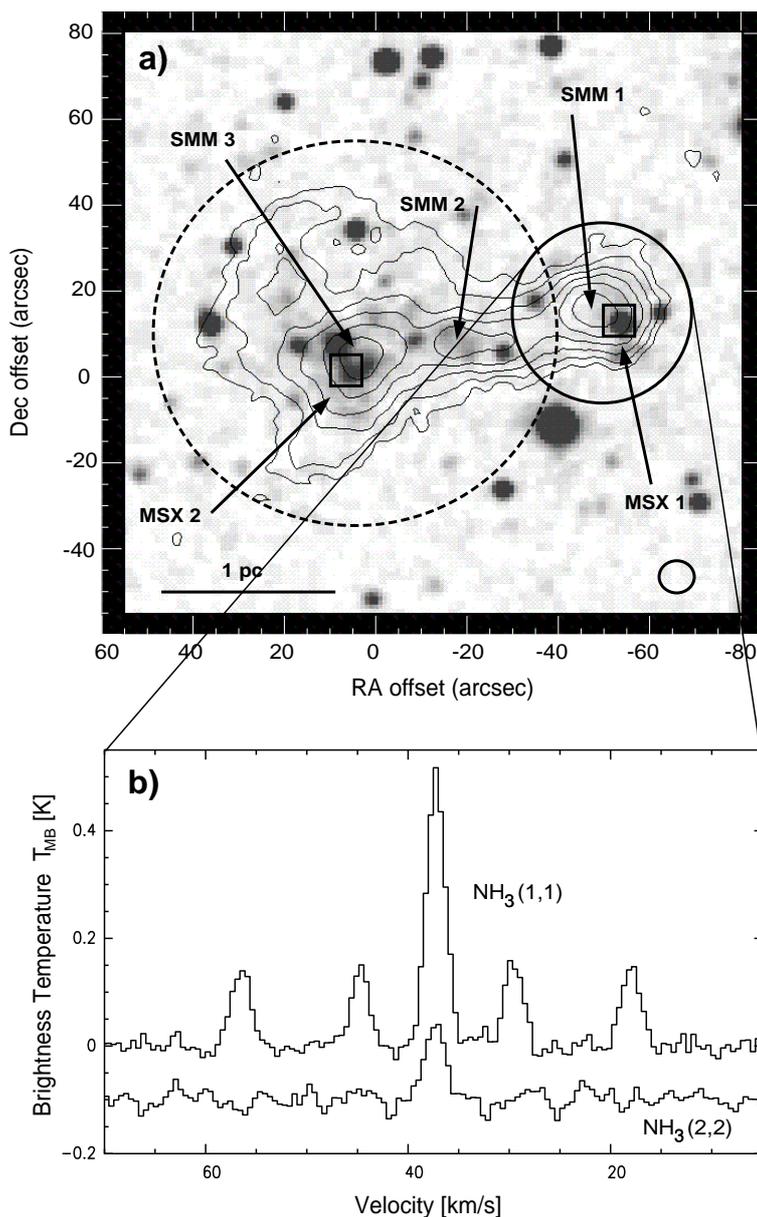


Abbildung 3.5: a) Konturenkarte des Sternentstehungsgebiets ISOSS 04225+5150 bei $450 \mu\text{m}$, überlagert auf eine K_S -Band Aufnahme der 2MASS-Himmelsdurchmusterung. Der Durchmesser der SCUBA-Hauptkeule ist in der unteren rechten Ecke angedeutet, der gestrichelte Kreis entspricht der räumlichen Auflösung von ISOPHOT. Die Konturen entsprechen Intensitäten von 260, 390, 585, 880, 1300 und 2000 mJy/beam. Die dargestellten Koordinaten-Offsets sind relativ zur Position der Ferninfrarot-Quelle ($\text{RA}=04^{\text{h}}22^{\text{m}}32.2^{\text{s}}$, $\text{Dec}=+51^{\circ}50'31''$, J2000) gegeben. b) Ammoniak-Spektrum an der Position der kompakten Submillimeter-Quelle SMM1. Gezeigt sind die Übergänge zwischen den Inversionsniveaus für $(J,K) = (1,1)$ und $(2,2)$. Die daraus abgeleitete kinetische Gastemperatur beträgt $16.6 \pm 1.5 \text{ K}$. Der Hauptkeulendurchmesser des 100m-Teleskops ist in der obenliegenden Karte angedeutet.

3.5.1 Morphologie der Staubemission

Insgesamt konnten 30 Sternentstehungsgebiete beobachtet werden. Abb. 3.7 zeigt Karten der mit SCUBA untersuchten Objekte. Wie zu erkennen ist, konnte die für den ISO-Satelliten punktförmige FIR-Emission räumlich aufgelöst werden. In allen ISOSS-Quellen ist eine ausge-

dehnte Staubkomponente zu sehen. Die Mehrzahl der Objekte weist darüberhinaus mindestens eine kompakte Submillimeter-Kondensation auf.

Exemplarisch zeigt Abb. 3.5 eine $450 \mu\text{m}$ Karte der kalten ISOSS-Quelle 04225+5150, die sich in einer Entfernung von 6 kpc im Perseus-Spiralarm befindet und eine Leuchtkraft von $L_{\text{IR}} = 11000 L_{\odot}$ besitzt. Im Optischen ist auf Aufnahmen des Digital Sky Survey im östlichen Bereich des Objekts ein schwacher Reflektionsnebel zu erkennen. Eine von Weinberger et al. (1999) durchgeführte Klassifikation dieser Quelle als Galaxie (ZOAG 152.42+01.49) kann daher ausgeschlossen werden. Die Untersuchung der spektralen Energieverteilung mit der zusätzlichen Vermessung des Rayleigh-Jeans-Astes in Abb. 3.6 bestätigt die aus den ISOSS/IRAS-Daten abgeleitete niedrige Staubtemperatur von $17 \pm 2 \text{ K}$. Die mit dieser Temperatur aus der optisch dünnen Emission bei $850 \mu\text{m}$ aus Gleichung (3.3) und einem Gas-zu-Staub Verhältnis von 150 bestimmte Gesamtmasse der Region beträgt $M(\text{H}_2) \sim 4700 M_{\odot}$.

Es sind drei kompakte Staubkondensationen (SMM1, SMM2 and SMM3) zu erkennen, die von einer diffusen Emissionskomponente umgeben sind. Die Positionen von MSX-Quellen im mittleren Infrarot sind in Abb. 3.5 markiert. Während SMM3 mit einer warmen Quelle im nahen und mittleren Infrarot assoziiert ist, ist SMM1 ein guter Kandidat für den massereichen prästellaren Kern eines zukünftigen Sternhaufens. Im Rahmen der astrometrischen Genauigkeit der SCUBA- und MSX-Daten kann die MIR-Quelle MSX1 allenfalls mit dem Außenbereich dieses Objekts assoziiert sein. Die aus den Messungen bei 450 und $850 \mu\text{m}$ abgeleitete Staubtemperatur von $T_{\text{d}} \sim 12 \text{ K}$ ergibt für SMM1 eine Masse von $M(\text{H}_2) \sim 300 M_{\odot}$.

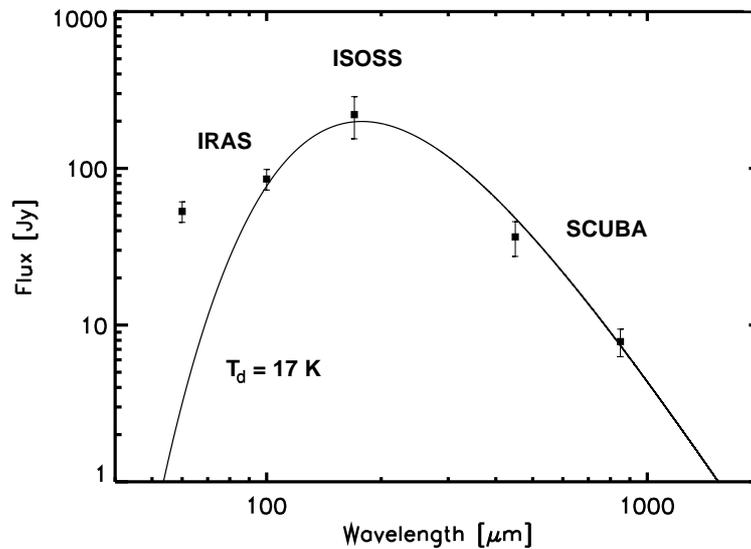


Abbildung 3.6: Spektrale Energieverteilung der ISOSS-Quelle 04225+5150 aus Abb. 3.5. Die Staubemission im fernen Infrarot ($\lambda > 60 \mu\text{m}$) und Submm-Bereich ist durch eine optisch dünne Staubkomponente der Temperatur $T_{\text{d}} = 17 \pm 2 \text{ K}$ charakterisiert. Diese stimmt gut mit der aus Ammoniak-Messungen abgeleiteten kinetischen Gastemperatur von $T_{\text{kin}} = 16.6 \pm 1.5 \text{ K}$ überein.

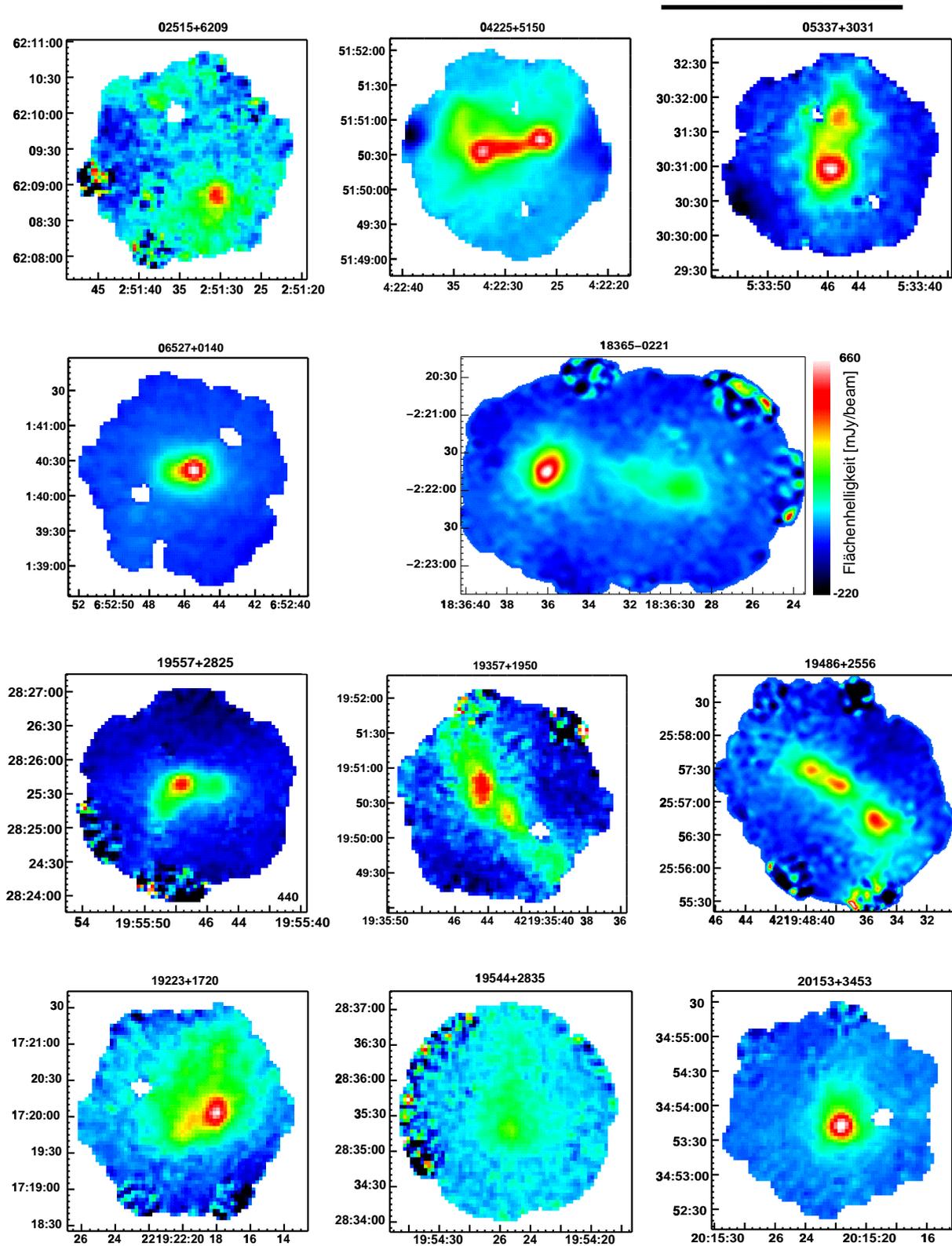


Abbildung 3.7: 850 μm Kontinuumskarten kalter massereicher Sternentstehungsgebiete der Zufallsdurchmusterung. Die Flächenhelligkeit ist in Falschfarben wiedergegeben, eine Farbskala bezeichnet den typischen Intensitätsbereich der beobachteten Objekte. Der Durchmesser der Hauptkeule beträgt $14.5''$.

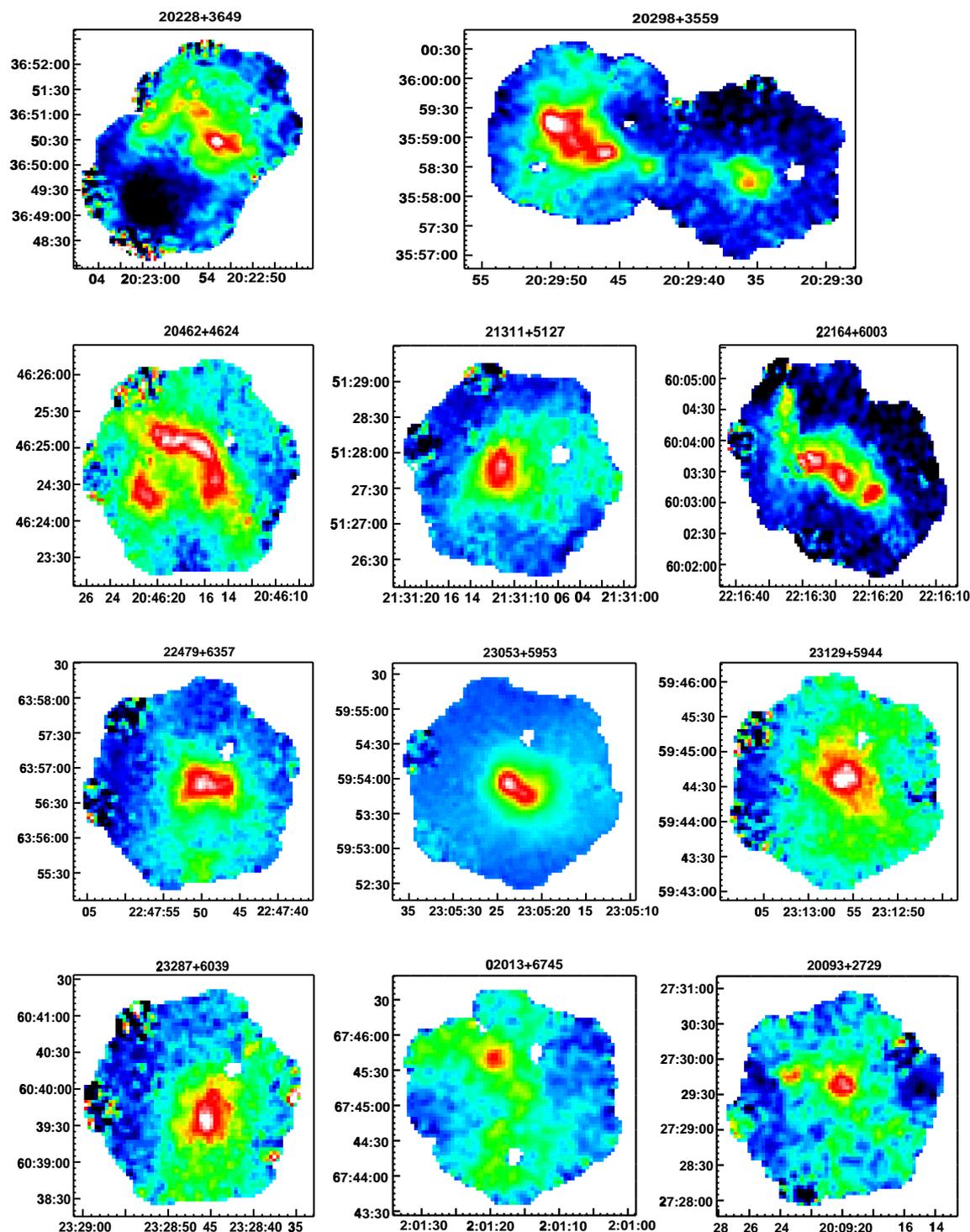


Abbildung 3.8: Fortsetzung

3.6 Ammoniak-Beobachtungen des dichten Gases

Da Staub nur einen kleinen Anteil der Masse in den kalten ISOSS-Quellen ausmacht, ist es geboten, den physikalischen Zustand des assoziierten molekularen Gases durch Radiobeobachtungen direkt zu analysieren. Bekanntlich kann der von der Masse dominierende molekulare Wasser-

stoff bei den typischen Anregungsbedingungen der ISOSS-Quellen nicht direkt beobachtet werden. Die hohe Säulendichte des Gases in massereichen Sternentstehungsgebieten führt zu optisch dicker Emission wichtiger Standardindikatoren wie Kohlenmonoxid und macht es sehr schwierig, den Zustand der dichten inneren Wolkenbereiche abzuleiten. Ammoniak ist dagegen ein gut geeigneter Indikator um Temperaturen, Säulendichten und Dichten solcher Molekülwolken zu bestimmen. Das NH_3 -Molekül ist symmetrisch und weist eine verhältnismäßig einfache Energiestruktur der Rotationsübergänge auf (Ho & Townes 1983). Strahlungsübergänge zwischen unterschiedlichen Zuständen K des Drehimpuls J um die Symmetrie-Achse durch das Stickstoff-Atom, wie etwa $(J,K)=(2,1) - (2,2)$, sind verboten. Deshalb ist die relative Besetzung z.B. der Energiezustände $(J,K)=(1,1)$ und $(2,2)$ im wesentlichen durch Stöße mit Wassermolekülen beeinflusst. Jedes dieser metastabilen Energieniveaus ist in zwei Komponenten aufgespalten, zwischen denen ein erlaubter Inversionsübergang stattfinden kann.

Aufgrund Hyperfeinstruktur besteht der $(1,1)$ Inversionsübergang aus insgesamt 18 Spektrallinien. Bei Linienbreiten von $\Delta v \sim 1 \text{ km/s}$ können diese nicht einzeln aufgelöst werden und bilden durch Überlagerung insgesamt 5 Liniengruppen. Die relative Stärke zwischen der mittleren Haupt- und den außenliegenden Satellitenkomponenten (siehe Abb. 3.5b) eines Inversionsübergangs erlaubt die Bestimmung der jeweiligen optischen Tiefe. Das Intensitätsverhältnis der Hauptkomponenten für $(J,K) = (2,2)$ und $(1,1)$ ermöglicht es nach Harju et al. (1993), das relative Besetzungsverhältnis der Rotationszustände abzuleiten und daraus die Rotationstemperatur T_{12} sowie die Säulendichte des Ammoniaks abzuleiten. Im Falle niedriger Temperaturen von etwa 10 K entspricht die Rotationstemperatur T_{12} der kinetische Temperatur T_{kin} des molekularen Wasserstoff. Bei genauer Berücksichtigung der Stoßanregung nach Walmsley & Ungehearts (1983), ist Ammoniak gut geeignet die kinetische Gastemperatur zuverlässig über einen größeren Temperaturbereich zu messen und wird deshalb als Wolken thermometer bezeichnet. Die Bestimmung der Masse molekularen Wasserstoffs aus den Ammoniak-Säulendichten ist jedoch (wie auch bei den meisten anderen Molekülen in kalten Dunkelwolken) schwierig, da sich die Häufigkeitsverhältnisse durch Ausfrieren und chemische Evolution stark ändern können (Bergin et al. 2002).

Ammoniak-Beobachtungen von Sternentstehungsgebieten aus der Zufallsdurchmusterung wurden mit dem 100m-Teleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg im September 2002 und Januar 2003 durchgeführt. Die Auflösung bei der Beobachtungsfrequenz von 23.7 GHz beträgt $40''$. Der Autokorrelator mit 8096 Kanälen erlaubte die gleichzeitige Beobachtung der Inversionsübergänge für $(J,K) = (1,1), (2,2), (3,3)$ und $(4,4)$ mit Ruhfrequenzen von 23694.49, 23722.633, 23870.130 sowie 24139.417 MHz. Die erreichte spektrale Auflösung beträgt 0.25 km/s. Die Positionsgenauigkeit und Absolutkalibration des Teleskops wurde durch Kontinuumsmessungen der Quelle NGC 7027 überprüft. Aus diesen Messungen folgt eine Positionsgenauigkeit von $5''$ und radiometrische Genauigkeit von 10 %. Die angenommene Antennentemperatur für NGC7027 ist 8.2 K entsprechend 5.86 Jy (Baars et al. 1977). Die Auswertung der Spektren erfolgte mit dem Programmpaket CLASS.

3.6.1 Detektionsstatistik

Insgesamt 30 ISOSS-Quellen konnten beobachtet werden. Die Objekte wurden kartiert, um die Verteilung und Temperatur des kalten dichten Gases aus der Messung der niedrig angeregten Inversionslinien NH_3 $(1,1)$ und $(2,2)$ bestimmen zu können. Im Rahmen der Beobachtungen

Tabelle 3.2: Aus den Ammoniak-Beobachtungen abgeleitete physikalische Parameter. Die Spalten bezeichnen (1) Quelle, (2) Entfernung, (3) Rotationstemperatur, (4) kinetische Temperatur (5) Säulendichte des Ammoniaks.

ISOSS J	Entfernung kpc	T_{12} K	T_{kin} K	$N(\text{NH}_3)$ cm^{-2}
04225+5150	6.0	15.50	16.6	2.84e+14
05337+3031	2.5	17.12	18.7	6.01e+13
06104+1643	6.8	12.86	14.8	1.53e+14
06114+1726	8.0	22.03	26.6	5.78e+13
06527+0140	6.4	18.65	21.3	2.73e+14
06527+0140	6.4	17.49	20.0	1.12e+14
18365-0221E	2.0	10.75	11.76	9.05e+14
18365-0221W	2.0	10.59	11.55	4.59e+14
19357+1950	4.0	10.85	11.89	5.88e+14
19557+2825	3.7	15.60	16.7	2.03e+14
20093+2729	2.0	9.87	10.3	4.46e+14
20153+3453	2.0	13.59	15.92	5.79e+14
20298+3559E	1.8	10.47	11.39	2.75e+14
20298+3559W	1.8	11.20	12.37	3.05e+14
21311+5127	3.5	18.96	21.5	5.17e+13
22479+6357	4.0	11.83	13.26	7.08e+14
23287+6039	4.0	14.17	15.0	1.44e+14

wurde zuerst um die Position der IR-Quelle eine Rasterkarte mit Rasterpunkten im Abstand eines Hauptkeulendurchmesser erhalten. Wurde Emission entdeckt, dann wurde die Kartierung um den Bereich des Maximums verfeinert und so weit ausgedehnt, bis die Konturlinien den halben Wert des integrierten (1,1) Linienflusses erreichten. Tab. 3.1 faßt die Ergebnisse der Ammoniak-Beobachtungen zusammen. Die Meßwerte sind für die Position des Intensitätsmaximums der integrierten NH_3 (1,1) Emission gegeben, ein typisches Spektrum ist in Abb. 3.5b für die Quelle ISOSS J 04225+5150 gezeigt.

(1,1) Emission konnte mit einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis größer 3 bei 17 Quellen nachgewiesen werden, 14 Objekte wurden zusätzlich in (2,2) detektiert. Die Nachweisrate von 57% ist damit vergleichbar mit Werten von 55% und 66% der ebenfalls am 100m-Teleskop durchgeführten Ammoniak-Durchmusterungen massereicher Sternentstehungsregionen von Schreyer et al. (1996) und Molinari et al. (1996). Es ist jedoch zu bedenken, daß jene Untersuchungen an deutlich helleren IRAS-Quellen durchgeführt wurden. Aus dem fehlenden Nachweis von Ammoniak läßt sich nicht unmittelbar schließen, daß kein dichtes Gas vorhanden ist. Die Häufigkeit von Ammoniak relativ zum molekularen Wasserstoff weist starke Schwankungen auf. Ammoniak wird als ein Molekül der späteren chemischen Entwicklung angesehen. Myers & Benson (1983) fanden eine höhere Häufigkeit von NH_3 in älteren Wolkenkernen, in denen sich bereits Sterne gebildet hatten.

Die große Bandbreite des eingesetzten Autokorrelators erlaubte es, an allen Rasterpositionen simultan auch Messungen der beiden höher angeregten Übergänge (3,3) und (4,4) zum möglichen Nachweis warmen Ammoniaks durchzuführen. Eine solche Emissionskomponente ist charakteristisch für den Fall eines eingebetteten "Hot Molecular Core (HMC)". Wie die letzte Spalte in Tab. 3.1 zeigt, konnte warmes Gas in keiner der Quellen gefunden werden. Mit einem typischen Verhältnis von $T_{\text{MB}}(3,3) / T_{\text{MB}}(1,1) \sim 0.3$ (im Falle des HMC-Prototyps IRAS20126+4104) wäre eine solche Komponente, wenn existent, aufgrund der guten atmosphärischen Beobachtungsbedingungen bei einer Reihe von Objekten nachgewiesen worden.

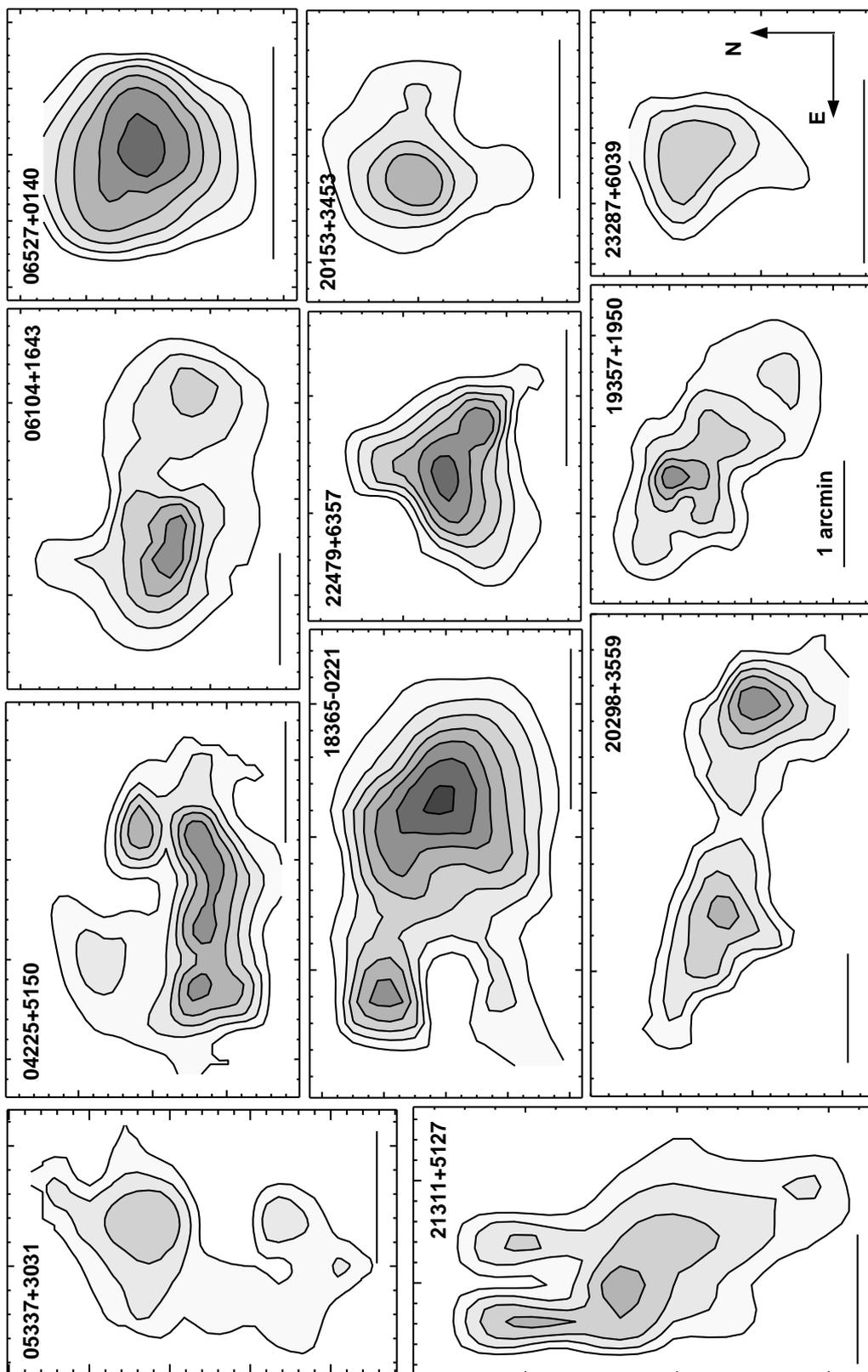


Abbildung 3.9: Karten integrierter NH_3 (1,1) Intensität kalter massereicher Sternentstehungsgebiete, erhalten mit dem Effelsberg 100m-Teleskop. Die Höhe des Maximums variiert zwischen 0.5 und 2 K km s^{-1} . Die horizontale Linie zeigt $1'$ an. Die Orientierung aller Karten ist unten rechts angedeutet.

3.6.2 Morphologie der dichten Molekülwolken

Karten integrierter Intensität des NH_3 (1,1)-Inversionsübergangs sind in Abb. 3.9 dargestellt. Sie zeigen, daß die ISOSS-Quellen mit kompakten Wolken dichten Gases assoziiert sind, deren Ausdehnung der Emission im Submillimeter-Kontinuum vergleichbar ist. Das Maximum der Staubemission fällt jedoch im Normalfall nicht mit dem Intensitätsmaximum der Ammoniak-Emission zusammen, dessen relative Lage zur Position der zugehörigen FIR-Punktquelle ist in Tab. 3.1 gegeben. In zwei Quellen (18365-0221 und 20298+3559) konnten räumlich getrennte NH_3 -Emissionsmaxima gefunden werden, die auch im Submillimeterbereich getrennt sind. Die in Tab. 3.2 angegebenen Säulendichten sind aus der über den Raumwinkel der Teleskop-Hauptkeule Ω_A gemittelten Antennentemperatur T_{MB} bestimmt und daher als untere Grenzen zu verstehen. Im Falle kompakter Emissionsgebiete der Größe Ω_Q würde die Berücksichtigung der um den Füllfaktors $\eta = \Omega_A/\Omega_Q$ korrigierten wahren Strahlungstemperatur T_S zu höheren Säulendichten führen.

3.6.3 Kinetische Temperatur des molekularen Gases

Eine der wichtigsten aus den Ammoniak-Messungen bestimmten Größen ist die kinetische Temperatur des Gases. Die Ammoniak-Beobachtungen erlauben die unmittelbare Bestimmung der (1,1)-(2,2) Rotations-Temperatur $T_{12}(\text{NH}_3)$, die ein direktes Maß für das Besetzungsverhältnis in den Energieniveaus (1,1) und (2,2) ist. Die Beziehung dieser Größe zur kinetischen Gastemperatur wurde von Walmsley & Ungerechts (1983) und Danby et al. (1988) untersucht. Die nach Danby abgeleiteten Temperaturen sind in Tab. 3.2 aufgeführt. Der durchschnittliche Meßfehler in T_{kin} liegt bei $\Delta T = 2$ K.

Bis auf ein wärmeres Objekt (06114+1726 mit $T_{\text{kin}} \sim 26.6$ K) weisen alle ISOSS-Quellen Gastemperaturen im Bereich $10 \text{ K} < T_{\text{kin}} < 22 \text{ K}$ auf. Die mittlere Temperatur von $\overline{T_{\text{kin}}} = 16.0 \pm 4.5$ K liegt wesentlich niedriger als in bisherigen Untersuchungen massereicher Sternentstehungsregionen (z.B. $\overline{T_{\text{kin}}} = 26.9 \pm 4.4$ K bei Schreyer et al. 1996) und stimmt gut mit der Temperatur des Staubes überein.

3.7 Zusammenfassung

Mit Hilfe einer Kreuzkorrelation kompakter ISOSS-Quellen mit Himmelsdurchmusterungen in den Moleküllinien von CO und CS wurden massereiche Sternentstehungsgebiete in der Zufallsdurchmusterung identifiziert. Die daraus ermittelten Radialgeschwindigkeiten erlaubten die Bestimmung kinematischer Entfernungen. Es konnten insgesamt 193 Objekte mit einer Leuchtkraft $L_{\text{IR}} > 100 L_{\odot}$ und/oder einer Gesamtmasse $M > 100 M_{\odot}$ gefunden werden. Dies stellt die größte Stichprobe massereicher Sternentstehungsgebiete dar, für die Messungen im FIR jenseits der IRAS 100 μm -Grenze vorliegen. Ein Großteil der Objekte ist bislang unbekannt. Die statistische Analyse der Stichprobe führte zu folgenden Ergebnissen:

1. Die gemittelte Leuchtkraft der Sternentstehungsgebiete beträgt $L_{\text{IR}} \sim 2000 L_{\odot}$ bei einer mittleren Gesamtmasse (Gas+Staub) von $250 M_{\odot}$. Die galaktische Verteilung der Quellen zeigt eine Häufung im Bereich der bekannten Galaktischen Spiralarme (Perseus- und Lokaler-Arm). Die durchschnittliche Entfernung der Objekte beträgt 5.9 kpc.

2. Die beobachteten $170\ \mu\text{m}$ Flüsse liegen im Bereich 10 - 600 Jy. Durch Ergänzung der ISOSS-Photometrie mit IRAS $100\ \mu\text{m}$ Flüssen konnte die Farbtemperatur der kalten Staubkomponente bestimmt werden. Diese beträgt $19 \pm 3\ \text{K}$ und liegt damit deutlich niedriger als die aus bisherigeren Submillimeter-Beobachtungen massereicher Sternentstehungsgebiete abgeleiteten Werte ($T \sim 30 - 40\ \text{K}$).
3. Während die thermische Emission bei 100 und $170\ \mu\text{m}$ durch große Staubteilchen im Strahlungsgleichgewicht dominiert wird, zeigt die Untersuchung der FIR-Farben, daß der Fluß bei $60\ \mu\text{m}$ weder durch diese optisch dünne, kalte Komponente noch durch optisch dicke, wärmere Staubemission beschrieben werden kann. Die beobachteten Flußverhältnisse sind charakteristisch für die Strahlungsemission kleiner Staubteilchen und weisen darauf hin, daß die aus IRAS 60 und $100\ \mu\text{m}$ Flüssen bestimmten Farbtemperaturen nicht dem thermischen Gleichgewicht entsprechen.

Von besonderem Interesse sind die kältesten dieser Objekte mit einer Farbtemperatur $T < 18\ \text{K}$. Deren hohes Masse-zu-Leuchtkraft-Verhältnis weist auf ein früheres Entwicklungsstadium als das von ultrakompakten HII-Regionen sowie massereichen protostellaren Objekte hin. Zur Untersuchung des physikalischen Zustandes dieser neuen Klasse kalter ISOSS-Quellen wurden bodengebundene Nachfolgebeobachtungen durchgeführt.

1. Mit der Bolometerkamera SCUBA konnten von 22 Objekten Karten der Staubemission im Submillimeter-Kontinuum bei 450 und $850\ \mu\text{m}$ erhalten werden. In allen Fällen ließ sich die für den ISO-Satelliten punktförmige FIR-Emission räumlich auflösen. Die Quellen zeigen eine komplexe Staubmorphologie mit kompakten Submillimeter-Kondensationen, die von ausgedehnteren Gebieten diffuser Emission umgeben sind.
2. Der Nachweis von Ammoniak war bei der Beobachtung von 30 Objekten mit dem Eifelberg 100m -Teleskop in 17 Fällen möglich. Dies belegt das Auftreten dichten Gases in den kalten ISOSS-Quellen. Die Kartierung dieser dichten Gaskomponente im Inversionsübergang von NH_3 (J,K)=(1,1) zeigt kompakte Wolken, deren räumliche Ausdehnung der Submillimeter-Emission vergleichbar ist.
3. In 14 Objekten konnte neben dem NH_3 (1,1) auch der (2,2) Inversionsübergang gemessen werden. Die zusätzliche Linie erlaubt die präzise Bestimmung der kinetischen Gastemperatur in den Objekten. Der gefundene Wert von $\overline{T_{\text{kin}}} \sim 16 \pm 5\ \text{K}$ stimmt mit den tiefen Staubtemperaturen in den Regionen überein. Auch die Gastemperatur liegt deutlich niedriger als die in bisherigen Untersuchungen massereicher Sternentstehungsgebiete gefundenen Werte ($T_{\text{kin}} \sim 27\ \text{K}$).
4. Höher angeregte NH_3 (3,3) und (4,4) Emission von wärmerem Ammoniakgas konnte nicht nachgewiesen werden. Dies weist auf die Abwesenheit eingebetteter "Hot Molecular Cores" hin und bestätigt den frühen Entwicklungszustand der Quellen.

Kapitel 4

Fallstudie I: Das junge Sternentstehungsgebiet ISOSS 20298+3559

Dieses Kapitel behandelt eine detaillierte Studie des Sternentstehungsgebiets ISOSS J 20298+3559. Das Objekt ist mit einem massereichen Dunkelwolkenkomplex ($M \sim 760 M_{\odot}$) assoziiert und befindet sich in der Riesenmolekülwolke Cygnus X. Eine Entfernung von 1800 pc konnte auf der Grundlage optischer Extinktion abgeleitet werden. Die niedrige mittlere Staubtemperatur ($T \sim 16$ K) und die große Masse ($M \sim 120 M_{\odot}$) des inneren Bereichs der Wolke, der bisher noch nicht aufgelöst wurde, deuten auf einen erst kürzlichen Beginn der Sternentstehung hin. Das geringe Alter der Region wird darüberhinaus durch den frühen Entwicklungszustand mehrerer (prä-)protostellarer Objekte unterstützt, die in der Region gefunden wurden: I) Zwei Kandidaten von Protosternen der Klasse 0 mit Massen von 8 und $3.5 M_{\odot}$, II) ein gravitationsgebundener, kalter ($T \sim 12$ K) und dichter ($n(\text{H}_2) \sim 2 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$) Wolkenkern mit einer Masse von $50 M_{\odot}$ und III) ein Herbig B2 Stern mit einer Masse von $6.5 M_{\odot}$ und einer bolometrischen Leuchtkraft von $2200 L_{\odot}$. Das Spektrum des Herbig Be-Stern zeigt Hinweise auf Akkretion und weist ein stellares Alter von weniger als 40000 Jahren auf. Der von außen geheizte Wolkenkern ist ein guter Kandidat für ein weiteres massereiches prästellares Objekt. Die Effizienz der Sternentstehung im zentralen Bereich der Wolke beträgt $\sim 14\%$.

4.1 Einleitung

Aufnahmen der Himmelsdurchmusterungen 2MASS (Cutri et al. 2000) und MSX (Price et al. 2001) zeigen, daß einige der in Kapitel 3 untersuchten Sternentstehungsgebiete mit Quellen im nahen und mittleren Infrarot assoziiert sind. Dies liefert Hinweise darauf, daß bereits aktive Sternentstehung im molekularen Gas der Objekte eingesetzt hat. Die Entstehung von Sternen hoher Masse in dichten Gruppen oder Haufen läßt besonders das Auftreten masseärmerer Begleiter erwarten. Da massereiche Sterne durch Photo-Ionisation und stellare Winde die weitere Bildung von Sternen in ihrer unmittelbaren Umgebung beenden können, ist es wahrscheinlich, daß sich solche massearmen Sterne zuerst bilden und möglicherweise an der Entstehung von Objekten höherer Masse beteiligt sind.

Im folgenden soll eine umfassende Untersuchung der Sternentstehungsaktivität in der Region ISOSS J 20298+3559 auf der Grundlage von Beobachtungen der kalten Molekülwolke einschließlich darin eingebetteter (proto)-stellarer Objekte beschrieben werden.

4.2 Beobachtungen

4.2.1 Submillimeter-Beobachtungen mit SCUBA & MAMBO

Karten im Submillimeter Kontinuum bei $450 \mu\text{m}$ und $850 \mu\text{m}$ wurden mit der Bolometerkamera SCUBA (Holland et al. 1999) am James-Clerck-Maxwell Telescope (JCMT) auf dem Mauna Kea (Hawaii) am 28. Juli 2001 aufgenommen. Die Beobachtungen konnten bei sehr guter und stabiler atmosphärischer Transmission ($\tau_{850\mu\text{m}} = 0.185 \pm 0.01$) durchgeführt werden. Zusätzlich wurden Kontinuums-Beobachtungen bei 1.2 mm Wellenlänge am 9. und 11. Juni 2001 mit dem IRAM 30m-Teleskop auf Pico Veleta (Spanien) mit der 37-Kanal Bolometer-Kamera MAMBO (Kreysa et al. 1998) durchgeführt.

Eine genauere Beschreibung dieser Beobachtungen ist in Kapitel 3.5 gegeben. Oberflächenunebenheiten des JCMT-Hauptspiegels haben zur Folge, daß der effektive Raumwinkel der einzelnen Bolometer von SCUBA bei der Beobachtung ausgedehnter Quellen (vor allem bei der kürzesten Wellenlänge $450 \mu\text{m}$) größer ist, als der geometrische Raumwinkel bei der Beobachtung von Punktquellen. Um den daraus resultierenden Meßfehler bei der Beobachtung der im Submillimeter-Bereich ausgedehnten Quelle FIR1 zu korrigieren, wurden alle Messungen mit der Referenzkarte einer Punktquelle nach dem SCLEAN Algorithmus (Keel 1991) entfaltet. Darüberhinaus können die gechoppten Submillimeter-Messungen durch Emissionen an der Stelle der Referenzposition verfälscht werden.

4.2.2 Direktaufnahmen im mittleren Infrarot mit UKIRT/MAX

Beugungsbegrenzte Aufnahmen im thermischen Infrarot wurden am 20. Dezember 2001 mit der am MPIA unter anderem für Nachfolgebeobachtungen von ISO-Quellen entwickelten MAX Kamera erhalten. MAX (Robberto et al. 1998) wurde am 3.8m United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT) auf dem Mauna Kea (Hawaii) eingesetzt. Die Kamera besteht aus einem 128×128 Si:As BIB-Detektor, der ein Gesichtsfeld von $35'' \times 35''$ bietet. Spektrophotometrische Aufnahmen wurden in drei Schmalbandfiltern ($\lambda_{\text{eff}} \sim 8.7, 9.7, 11.6 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda \sim 1.0 \mu\text{m}$) und in den Bändern M, N und Q erhalten. Alle Beobachtungen wurden mit differentiellen Meßmethoden (Chopping/Nodding) durchgeführt. Der Chop-Hub betrug $25''$, die Chop-Frequenz 2.5 Hz . α Tau und α Boo dienten als Kalibrationsquellen. Die Flüsse in den Schmalbandfiltern wurden durch synthetische Photometrie der Modellspektren von Cohen (1995) erhalten. Alle Bilder wurden schließlich mit dem Algorithmus von Richardson & Lucy (1974) und den Aufnahmen der Standardsterne als wahre Punktquellen entfaltet, womit eine Auflösung von $0.6''$ FWHM erreicht wurde. Die photometrische Genauigkeit beträgt 20% .

4.2.3 Optische Spektroskopie und Photometrie

Optische Langspalt-Spektren wurden mit Hilfe des TWIN Doppelspektrographen am 3.5m-Teleskop des Deutsch-Spanischen Astronomischen Zentrums auf dem Calar Alto (Spanien) am 12. Dezember 2000 gewonnen. Die spektrale Dispersion betrug $0.55 \text{ \AA}/\text{Pixel}$ für den blauen ($3400\text{-}5500 \text{ \AA}$) und $1.1 \text{ \AA}/\text{Pixel}$ für den roten ($6300\text{-}7100 \text{ \AA}$) Spektralbereich. Um ein optimales Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erzielen, wurden die Spektren nach der Methode von Horne

(1986) extrahiert. Die spektrophotometrische Kalibrationsgenauigkeit, durch wiederholte Messungen an Standardsternen überprüft, beträgt 10 %.

CCD-Direktaufnahmen in den Breitband-Filtern Johnson B, V, R und I wurden mit dem 0.7m-Teleskop des Max-Planck-Instituts für Astronomie auf dem Königstuhl in Heidelberg gewonnen. Das Teleskop war dazu mit einem Tektronix-Detektor mit 1024x1024 Bildelementen (Skala 0.89"/Pixel) ausgestattet. Die Reduktion sowohl der spektroskopischen als auch der Direktaufnahmen erfolgte mit Standard-Prozeduren des Programmpaketes IRAF. Die tiefe CCD-Aufnahme im I-Band erlaubte die photometrische Vermessung von ungefähr 3000 Sternen mit Hilfe von DAOPHOT (Stetson et. al 1987) zur Extinktionsuntersuchung der Region. Diese Photometrie ist vollständig bis zur Grenzhelligkeit $I = 18.8$ mag bei einer photometrischen Unsicherheit von $\sigma < 0.2$ mag.

4.2.4 Ammoniak-Messungen mit dem Effelsberg 100m-Teleskop

Moleküllinien-Spektroskopie von Ammoniak wurde mit dem 100m-Teleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg im Januar 2003 gewonnen. Für eine Beschreibung über Durchführung und Auswertung der Ammoniak-Beobachtungen siehe Kapitel 3.6.

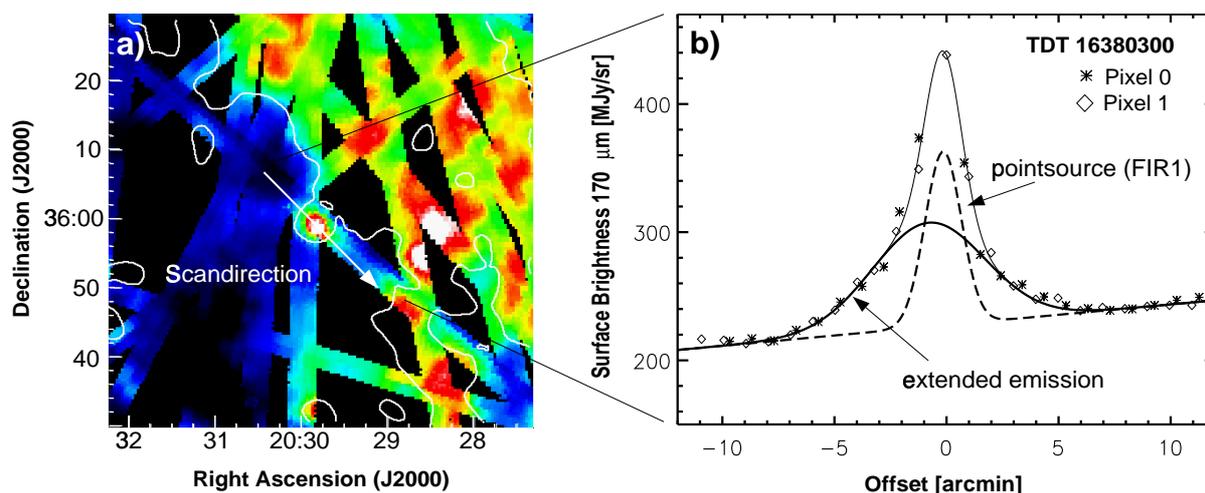


Abbildung 4.1: a) Karte der 170 μm Flächenhelligkeit im Gebiet der kalten Quelle ISOSS J 20298+3559. Der Helligkeitsbereich von 180 to 400 MJy/sr ist in Falschfarben dargestellt. Überlagert ist die 240 MJy/sr Kontur der 100 μm Flächenhelligkeit gemessen mit IRAS und in HIRES Prozessierung. b) 170 μm Flächenhelligkeit entlang eines zentral über die Region verlaufenden ISOSS Schwenks (TDT16380300, Pfeil in Abb. 4.1a). Das Helligkeits-Profil wurde aus Messungen mit 2 Bildelementen der ISOPHOT C200 Kamera konstruiert und setzt sich aus Beiträgen einer kompakten Quelle (FIR1) und einer ausgedehnten Komponente zusammen.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Morphologie der kalten ISOSS Quelle

Abb. 4.1 zeigt die 170 μm Beobachtungen von ISOSS J 20298+3559 im Rahmen der ISOPHOT Zufallsdurchmusterung. Die Karte der 170 μm Kontinuumstrahlung, die aus allen Schwenks

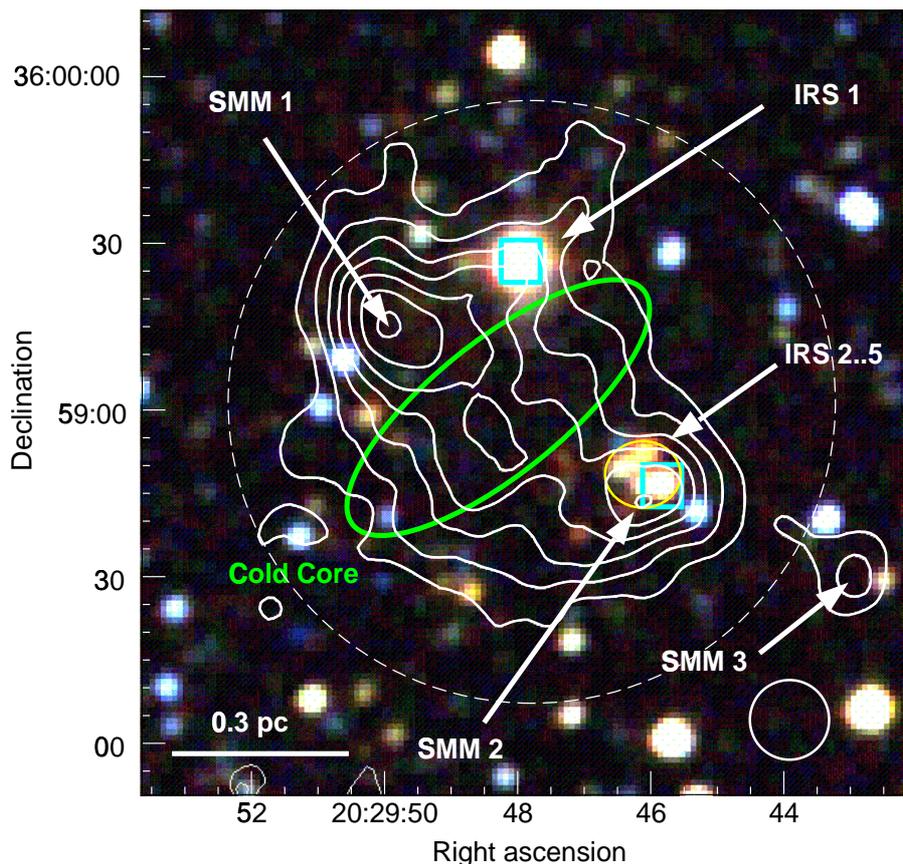


Abbildung 4.2: Konturen der $850 \mu\text{m}$ Flächenhelligkeit der kompakten Quelle FIR1 aus der ISOPHOT Zufallsdurchmusterung. Der Durchmesser der Hauptkeule von SCUBA ist unten rechts angedeutet, der von ISOPHOT durch den gestrichelten Kreis. Die Konturen sind einer Komposit-Aufnahme des Objektes im nahen Infrarot überlagert, die aus 2MASS-Daten erzeugt wurde. Rot, Grün und Blau der Falschfarbendarstellung entsprechen den ursprünglichen Filtern J,H,K_S. Die Konturen beginnen mit 67 mJy/beam und sind dann um jeweils weitere 33 mJy/beam erhöht. Drei kompakte Staubkondensationen (SMM1, SMM2 und SMM3) sind zu erkennen. Sie werden von einer diffusen Emissionskomponente umgeben. Die Positionen von MSX-Punktquellen im mittleren Infrarot sind durch Quadrate gekennzeichnet. Der Submillimeter-Knoten SMM2 ist mit einer kleinen Gruppe von eingebetteten NIR-Quellen (IRS2...5) assoziiert, die von 2MASS und MSX nachgewiesen wurden. Die helle Quelle IRS1 ist ein Herbig B2-Stern. Dies zeigten optische spektroskopische Messungen. Die zwei kompakten Submillimeter-Quellen ohne Gegenstück im Infraroten, SMM1 und SMM3, sind Kandidaten für Protosterne in der frühesten Entwicklungsphase, sog. Objekte der Klasse 0. Die Position des sehr kalten Wolkenkerns ist durch eine Ellipse angedeutet.

der Region erzeugt wurde, zeigt die kompakte Quelle auf einem hellen galaktischen Hintergrund. Der Karte überlagert sind $100 \mu\text{m}$ Konturlinien, die eine frühere Detektion der Quelle im Rahmen der IRAS-Mission zeigen (IRAS20278+3549). Die höhere räumliche Auflösung von ISOPHOT erlaubt es, zwei unterschiedliche Emissionskomponenten aus dem zentralen Schwenk über das Objekt abzuleiten (Abb. 4.1b). Die gemessene $170 \mu\text{m}$ Emission kann demnach gut durch die Überlagerung einer nicht aufgelösten Punktquelle (FIR1) mit einer Flußdichte von $F_{170\mu\text{m}}=110 \text{ Jy}$ und einer ausgedehnten Emissionskomponente (Größe $5.9'$ FWHM, max. Flächenhelligkeit $I_{170\mu\text{m}} = 90 \text{ MJy/sr}$) beschrieben werden.

Hochaufgelöste Karten im (Sub)millimeter-Kontinuum bei Wellenlängen von $450 \mu\text{m}$ und 850

μm mit SCUBA sowie 1.2 mm mit MAMBO wurden in Richtung der Punktquelle FIR1 erhalten. Abb. 4.2 zeigt 850 μm Konturen überlagert auf ein Nahinfrarot (JHK_S) Farbkomposit aus Daten der 2MASS-Durchmusterung. FIR1 ist in dieser Abbildung durch einen gestrichelten Kreis entsprechend dem ISOPHOT-Beam (1.5') angedeutet. Mit seinem großen Hauptspiegel von 15m Durchmesser verfügt das JCMT über eine ausreichend hohe räumliche Auflösung, um die Struktur der ISOSS-Punktquelle im Submillimeterbereich aufzulösen. Die 450 μm und 850 μm Karten zeigen einen dichten Wolkenkern (Ellipse), der von ausgedehnter Emission umgeben ist. Diese ausgedehnte Emissionskomponente nimmt eine Fläche von ungefähr $100'' \times 70''$ ein und erstreckt sich nordöstlich und südwestlich des Wolkenkerns. Wie Tab. 4.1 zu entnehmen ist, macht sie den größten Anteil am Gesamtfluß des Objektes aus.

Drei kompakte Staubkondensationen (SMM1, SMM2 und SMM3) konnten im Submillimeter-Bereich detektiert werden. Positionen und Flüsse dieser kompakten Quellen wurden durch eine zweidimensionale Entfaltung mit der Gauss'schen Hauptkeule des JCMT bzw. IRAM 30m-Teleskops nach vorheriger Subtraktion des lokalen Hintergrundes bestimmt. Die intrinsische Größe der Quellen wurde dabei aus den 450 μm Daten abgeleitet, welche die höchste verfügbare räumliche Auflösung besitzen. Die 1.2 mm Flüsse der beiden schwächeren Objekte SMM2 und SMM3 wurden aufgrund unzureichender Bestimmung des lokalen Hintergrundes bei dieser Wellenlänge nicht abgeleitet. Tab. 4.1 faßt die Ergebnisse zusammen: Die integrierten Flußdichten von FIR1 im (Sub)millimeter-Bereich innerhalb einer kreisförmigen Blende von 2.4' Durchmesser sind $F_{450\mu\text{m}} = 27.5$ Jy, $F_{850\mu\text{m}} = 3.9$ Jy und $F_{1.2\text{mm}} = 1.1$ Jy. Die Wahl dieser Blende umfasst das Gesichtsfeld von SCUBA und schließt den größten Teil des Gesichtsfelds der ISOPHOT C200-Kamera ein.

Tabelle 4.1: Photometrie von (Sub)millimeter Quellen, die mit ISOSS J 20298+3559-FIR1 assoziiert sind. Für die Bestimmung der Gesamtflüsse von SMM1, SMM2 und SMM3 wurde der Wert des lokalen Hintergrundes am Ort der Quellen abgezogen. Der Hauptkeulendurchmesser für die Messungen bei 450 μm , 850 μm sowie 1.2 mm beträgt 7.5'', 14.5'' bzw. 10.5''.

Quelle	Position [J2000]		Gesamtfluß			Größe pc	Max. Flußdichte mJy/beam ⁻¹		
	α	δ	450 μm	850 μm	1.2 mm		450 μm	850 μm	1.2 mm
SMM1	20:29:49.9	+35:59:15	1.26	0.233	0.075	0.1 x 0.2	690	251	80
SMM2	20:29:45.6	+35:58:46	0.31	0.091	-	<0.07	610	206	-
SMM3	20:29:48.2	+35:59:24	1.05	0.155	-	0.15 x 0.2	290	117	-
Kalter Kern ausgedehnt	20:29:48.4	+35:58:57	6.02	0.902	0.33	0.55 x 0.29	410	203	60
	-	-	18.86	2.47	0.7	0.9 x 0.7	368	173	-

4.3.2 Entfernung und großflächige Struktur

Entfernungen zu Sternentstehungsgebieten werden oftmals aus deren Radialgeschwindigkeiten unter der Verwendung eines Galaktischen Rotationsmodells abgeleitet (Brand & Blitz 1993). Eine bekannte Schwierigkeit für die Anwendung der kinematischen Entfernungsbestimmung in Richtung des Sternbildes Schwan ist der nahe bei Null liegende galaktische Geschwindigkeitsgradient bis zu einer heliozentrischen Entfernung von etwa 2 kpc. Um eine verlässliche Entfernung zum Objekt ISOSS J 20298+3559 abzuleiten, wurde ein Wolf-Diagramm aus Sternzählungen im I-Band angefertigt. Solche Sternzählungen gehören bei ausreichend opaquen Dunkelwolken zu den genauesten Methoden der Entfernungsbestimmung. Für die vorliegen-

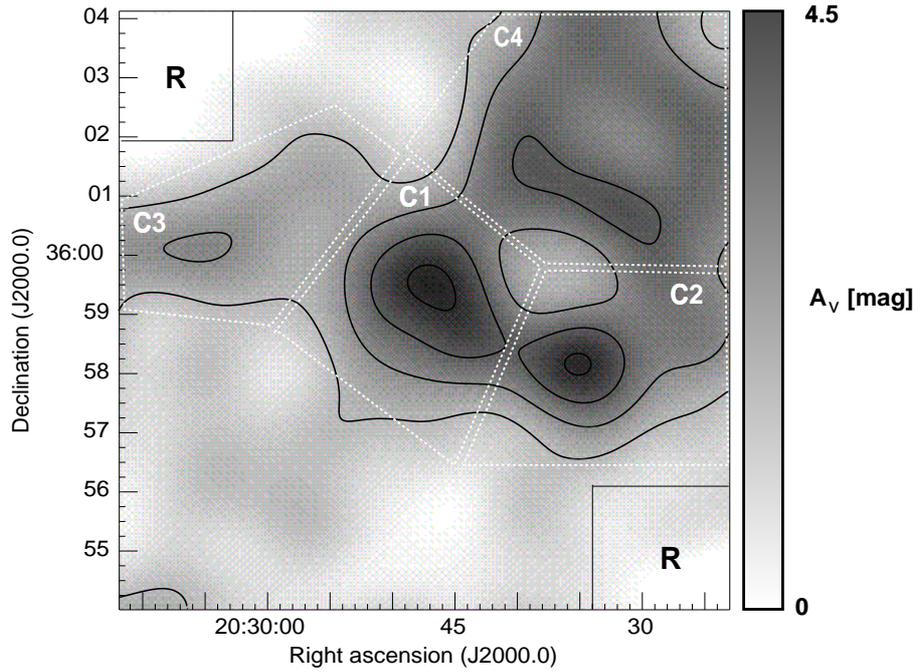


Abbildung 4.3: Extinktionskarte des Sternentstehungsgebietes ISOSS J 20298+3559. Vier unterschiedliche Dunkelwolkenfragmente (C1..C4) sind zu erkennen. Dargestellt ist die visuelle Extinktion A_V in Größenklassen. Sie wurde aus Sternzählungen im I-Band errechnet, das einen tieferen Blick durch die Staubverteilung des Objektes erlaubt. Die überlagerten Konturen kennzeichnen eine relative Extinktion von $A_V = 1.5, 2.5, 3.5$ und 4.5 mag. Die Rechtecke (markiert mit 'R') zeigen die beiden Referenzfelder, die zur Definition des Nullpunktes verwendet wurden. Um die gesamte Extinktion entlang der Sichtlinie zu erhalten, muß die Vordergrundextinktion von $A_V = 2.7$ mag zu den angezeigten Werten addiert werden.

de Extinktionsstudie kamen tiefe I-Band Aufnahmen zum Einsatz, die am 0.7m-Teleskop des Max-Planck-Instituts für Astronomie gewonnen werden konnten. Die aus den Sternzählungen angefertigte Extinktionskarte erlaubt darüberhinaus das Studium der großflächigen Verteilung des mit der kalten ISOSS-Quelle assoziierten Staubes.

Abb. 4.3 zeigt die nach der Methode von Bok (1956) konstruierte und nachfolgend auf die räumliche Auflösung von ISOPHOT gebrachte Extinktionskarte. Ein adaptives Gitter (Reseau-Größe $\sim 1'$) wurde verwendet, um ein Optimum zwischen räumlicher Auflösung und stellarer Dichte zu finden (Cambrésy et al. 1997). Die beobachtete Extinktion der Wolke A^{obs} in Bezug auf die Referenzpositionen wurde aus der Anzahldichte N^b der Sterne, die durch die Wolke gesehen werden sowie deren unbeeinflusster Referenz-Dichte N_{ref}^b berechnet:

$$A^{obs} = -\frac{1}{a} \log \frac{N_{ref}^b}{N^b} \quad (4.1)$$

Dabei bezeichnet a die Steigung der stellaren Leuchtkraftverteilung im I-Band. Um die Beobachtungen im I-Band mit der visuellen Extinktion A_V in Beziehung zu setzen, wurde ein Verhältnis von $A_V / A_I = 2.07$ (Rieke & Lebofsky 1985) angenommen. Die Referenz-Felder befinden sich an den Minima der Säulendichte des Staubes in der $170 \mu\text{m}$ Karte und sind in Abb. 4.3 mit einem 'R' gekennzeichnet.

Der aus der einfachen Form der Bok-Formel abgeleitete Wert der Extinktion A^{obs} ist systematisch kleiner als die wahre Extinktion A^{true} einer entfernten Dunkelwolke aufgrund der Konta-

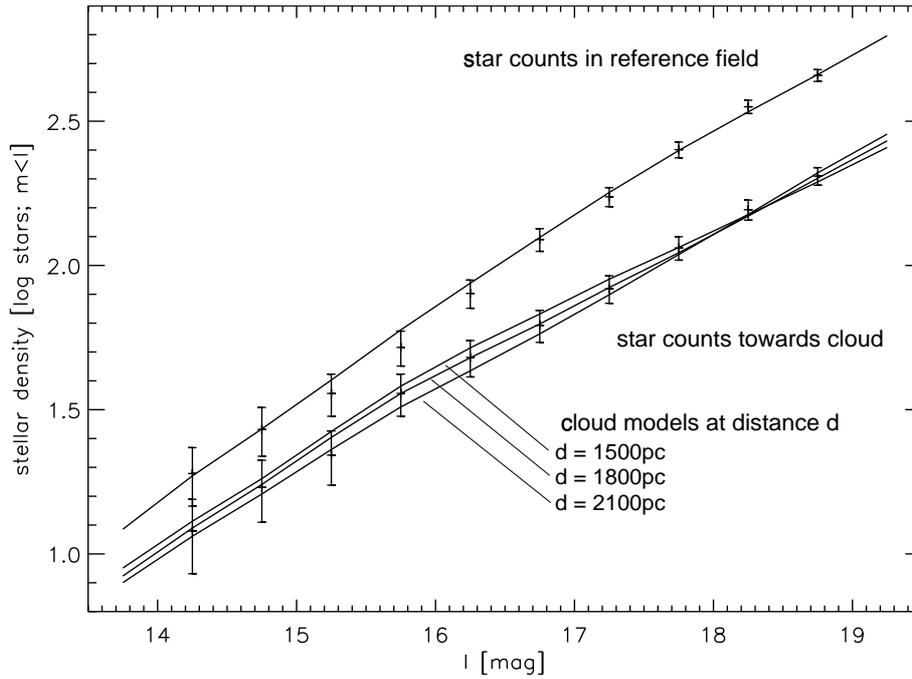


Abbildung 4.4: Wolf-Diagramm kumulativer Sternzählungen im I-Band in Richtung der Dunkelwolke (untere Meßpunkte) und der Referenzfelder (obere Meßpunkte). Die Fehlerbalken entsprechen $\pm 1\sigma$ einer Poisson-Statistik. Die Messungen in Richtung der Referenzfelder sind in guter Übereinstimmung mit den Vorhersagen des verwendeten Modells der Galaktischen Sternverteilung. Der Einfluß der Dunkelwolke auf die Sternzählung wurde bei Variation der Entfernung mit Hilfe einer Monte-Carlo Simulation berechnet (überlagerte Kurven). Die beste Übereinstimmung für den Dunkelwolkenkomplex ISOSS J 20298+3559 ergibt sich bei einer Entfernung von 1.8 ± 0.3 kpc.

mination durch Vordergrundsterne. Sie erniedrigen den Dichtekontrast in Richtung der Wolke. Weil sie nicht durch die Wolke beeinflusst werden, bleibt die Dichte der ordergrundsterne konstant: $N^f = N_{\text{ref}}^f$. Um den Beitrag der Vorder- und Hintergrundsterne zu berücksichtigen, wurde die allgemeine Form der Bok-Formel benutzt (z.B. Cambrésy et al. 2002), die einen Wert für die wahre Extinktion A_I^{true} in Abhängigkeit des Anteils der Hintergrundsterne liefert.

Abb. 4.4 zeigt das Wolf-Diagramm sowohl für die Referenz-Felder (obere Meßpunkte) als auch in Richtung des dichten Bereichs der Dunkelwolke ($A_I^{\text{obs}} > 1$ mag, untere Meßpunkte). Im Diagramm ist der Logarithmus der kumulativen Verteilung scheinbarer Helligkeiten und deren Fehlerbalken von $\pm 1 \sigma$ unter Annahme einer Poisson-Statistik gezeigt. Die gemessene Anzahldichte im Referenzfeld stimmt ausgezeichnet mit der Vorhersage des Galaktischen Verteilungsmodells von Robin & Creeze (1986) überein. Dieser Verteilung überlagert wurde ein mittlerer interstellarer Extinktionskoeffizient von $A_V = 1.5$ mag kpc^{-1} im Entfernungsbereich $0 < d < 4$ kpc sowie $A_V = 0.7$ mag kpc^{-1} jenseits von 4 kpc. Die höhere Extinktion unterhalb von 4 kpc kann Staub in mehreren Riesenmolekülwolken im Lokalen Spiralarm zugeordnet werden. Dieser erstreckt sich bis zur sogenannten “Zwischen-Arm Lücke”, die den Lokalen Arm vom Perseus-Spiralarm trennt und sich bei einer Entfernung von ungefähr 4 kpc befindet (Ungerechts et al. 2000). Die über die gesamte Sichtlinie im Bereich $0 < d < 5$ kpc integrierte Extinktion von $A_V = 6.7$ mag in Richtung der Referenz-Felder stimmt gut mit dem Wert von $A_V = 6.9 \pm 0.7$ mag überein, den Schlegel et al. (1998) aus Messungen des $100 \mu\text{m}$ Staub-Kontinuums mit IRAS abgeleitet haben.

Um die Form des Wolf-Diagramms richtig zu interpretieren, wurde ausgehend von der stellaren Verteilung im Referenzfeld der Einfluß einer Dunkelwolke auf die Sternzählung bei Variation der Entfernung und mittlerer Extinktion A_V^{true} mit Hilfe einer Monte-Carlo Simulation berechnet. Dabei wurde angenommen, daß die Extinktion in der Wolke auf kleinen Skalenlängen eine Gaussverteilung um den Mittelwert A_V^{obs} aufweist, der in einer verhältnismäßig großen Blende von $\sim 1'$ bestimmt wurde. Die unteren Kurven in Abb. 4.4 zeigen die Ergebnisse der Simulation für die drei besten Modelle der Dunkelwolke, die sich bei Entfernungen von 1.5, 1.8 und 2.1 kpc befinden. Die Beobachtungen ergeben damit eine Entfernung von $d = 1.8 \pm 0.3$ kpc zum Wolkenkomplex und eine gemittelte Extinktion über die Dunkelwolke von $A_V = 3.1 \pm 0.5$ mag. Der Gesamtfehler stammt dabei zum überwiegenden Teil aus dem statistischen Fehler der Sternzählung. Unter der Annahme eines interstellaren Extinktionskoeffizienten von $A_V = 1.5$ mag kpc $^{-1}$ aus dem Referenzfeld folgt eine Vordergrundextinktion von $A_V = 2.7 \pm 0.3$ mag in der Richtung von ISOSS J 20298+3559.

Eine empirische Methode, die Entfernung einer Dunkelwolke zu bestimmen basiert auf dem Schätzwert $d = 320N^{0.57}$ pc nach Herbst & Saywer (1981). Danach sind die Entfernung der Wolke und die Zahl N der Vordergrundsterne in einer kreisförmigen Blende mit $5'$ Durchmesser auf dem Blauauszug des Palomar Observatory Sky Survey (POSS) miteinander verknüpft. Auf der Grundlage der Anzahl der Sterne im USNO-PMM Katalog (Monet 1996), der auf dem POSS-B basiert, läßt sich eine Entfernung von $d \sim 2.2$ kpc zum Wolkenkomplex bestimmen. Beim Vergleich der Entfernungen ist zu bedenken, daß die Formel von Herbst & Saywer streng genommen nur für opaque Dunkelwolken gilt ($A_V > 7$ mag). Die geringfügig höhere Entfernung kann daher aus dem teilweise durchsichtigeren Charakter von ISOSS J 20298+3559 gedeutet werden..

4.3.3 Masse des Dunkelwolkenkomplexes

In der Extinktionskarte in Abb. 4.3 ist die Aufteilung der mit ISOSS J 20298+3559 verbundenen Dunkelwolke in insgesamt vier getrennte Segmente (C1...C4) ersichtlich. C1 fällt mit der kalten Quelle FIR1 zusammen und ist für die ausgedehnte Emissionskomponente dieser Quelle verantwortlich, wie in Abb. 4.1b gezeigt. Der Dunkelwolkenkomplex zeigt darüberhinaus ein schmales Extinktionsgebiet im östlichen Bereich (C3) und erstreckt sich in nordwestlicher Richtung bis an den Rand des kartierten Gebietes (C4).

Die Gesamtmassen der Wolken wurden aus der Extinktionskarte nach der Beziehung von Dickman (1978) bestimmt:

$$M = (\Delta\Omega d)^2 \mu \frac{N(H)}{A_V} \sum_i A_V(i), \quad (4.2)$$

Dabei bezeichnet $\Delta\Omega$ den Raumwinkel der Karte, d ist die Entfernung zur Wolke, μ bezeichnet das mittlere molekulare Gewicht der Gas-Komponente und i steht für die einzelnen Kartenpixel. Mit dem Gas/Staub-Verhältnis von $N(H)/A_V = 1.87 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2} \text{ mag}^{-1}$ ($N(H) = N(HI) + 2N(H_2)$) nach Savage & Mathis (1979) besitzt die Dunkelwolke eine Gesamtmasse von $760 M_\odot$. Tab. 4.2 faßt die Eigenschaften aller vier Wolkenbereiche zusammen. Aufgrund systematischer Unsicherheiten bei der Extinktionsbestimmung und dem Konversionsfaktor muß davon ausgegangen werden, daß die hier abgeleiteten Massen eine Unsicherheit von einem Faktor 2 haben können.

Tabelle 4.2: Unterschiedliche mit ISOSS J 20298+3559 assoziierte Wolken. Die Spalten bezeichnen: (1) Name, (2) Ort des Extinktionsmaximums, (3) Masse $M(\text{HI}) + M(\text{H}_2)$, (4) Extinktionsmaximum A_V und (5) Größe.

Name	Position [J2000] α, δ	Masse M_\odot	Peak A_V mag	Größe pc^2
C1	20:29:46.8 +35:59:30	188	4.7	2.0×1.7
C2	20:29:35.1 +35:58:09	162	4.6	1.9×1.7
C3	20:30:05.3 +36:00:07	115	2.6	2.5×1.5
C4	20:29:31.9 +36:00:49	295	3.7	2.3×2.2

4.3.4 Eigenschaften der Staubkomponente in der Quelle FIR1

Abb. 4.5 zeigt die spektrale Energieverteilung des kalten Gebietes FIR 1. Jenseits einer Wellenlänge von $100 \mu\text{m}$ dominiert die Strahlungsemission von großen Staubkörnern mit Eismantel, die im thermischen Strahlungsgleichgewicht mit der Umgebung stehen.

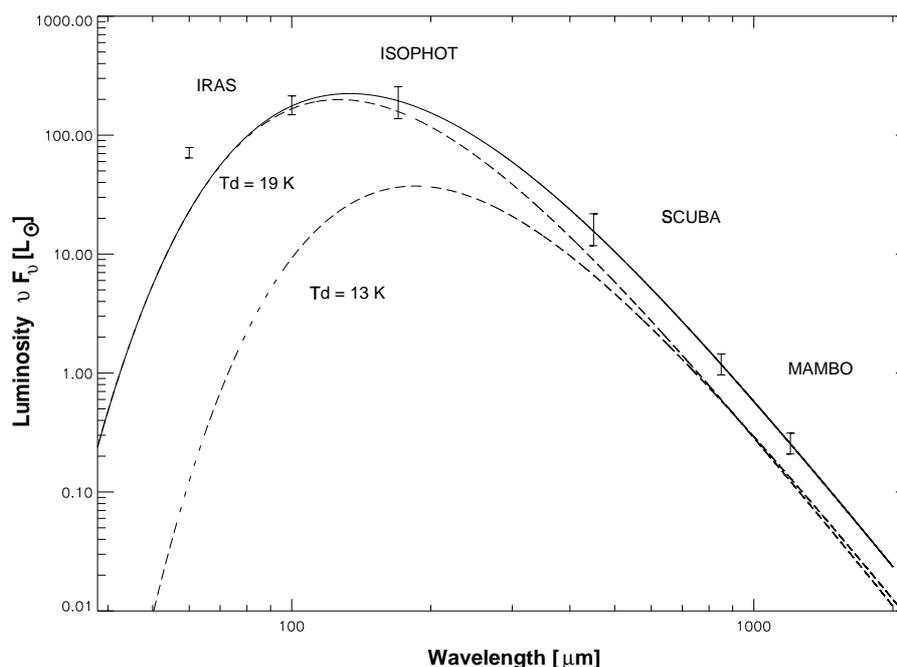


Abbildung 4.5: Spektrale Energieverteilung der kalten kompakten ISOSS-Quelle FIR1. Die beobachtete Flußdichte kann für $\lambda > 80 \mu\text{m}$ durch die Überlagerung optisch dünner Strahlung zweier modifizierter Schwarzer Körper (Emissivitätsindex $\beta = 2$) mit Staubtemperaturen von $T_d = 13 \pm 2 \text{ K}$ und $T_d = 19 \pm 2 \text{ K}$ beschrieben werden.

Die (Sub)millimeter-Flußdichte der diffusen Staubkomponente in FIR1 ist durch optisch dünne thermische Strahlung zweier modifizierter Schwarzer Körper $F_\nu \propto \nu^\beta B(\nu, T_d)$ charakterisiert. Die Staubtemperaturen betragen $T_d = 13 \pm 2 \text{ K}$ und $T_d = 19 \pm 2 \text{ K}$, als Emissivitätsindex wurde $\beta=2$ angenommen. Die Meßpunkte in Abb. 4.5 schließen dabei die Knoten SMM1, SMM2 und SMM3 nicht mit ein. Wie aus Tab. 4.1 ersichtlich, macht der Anteil von SMM1, SMM2

und SMM3 an der gesamten Flußdichte im Submillimeter-Bereich weniger als 15 % aus. Im deutlich größeren Gesichtsfeld des ISO- und IRAS-Satelliten können diese Quellen räumlich nicht aufgelöst und deren Beitrag zum Gesamtfluß nicht bestimmt werden. Wenn sie jedoch signifikant zur integralen Leuchtkraft im fernen Infrarot beitragen sollten, würde dies die abgeleitete Staubtemperatur der diffusen Staubkomponente noch weiter senken und die abgeleitete Staubmasse in der Konsequenz erhöhen.

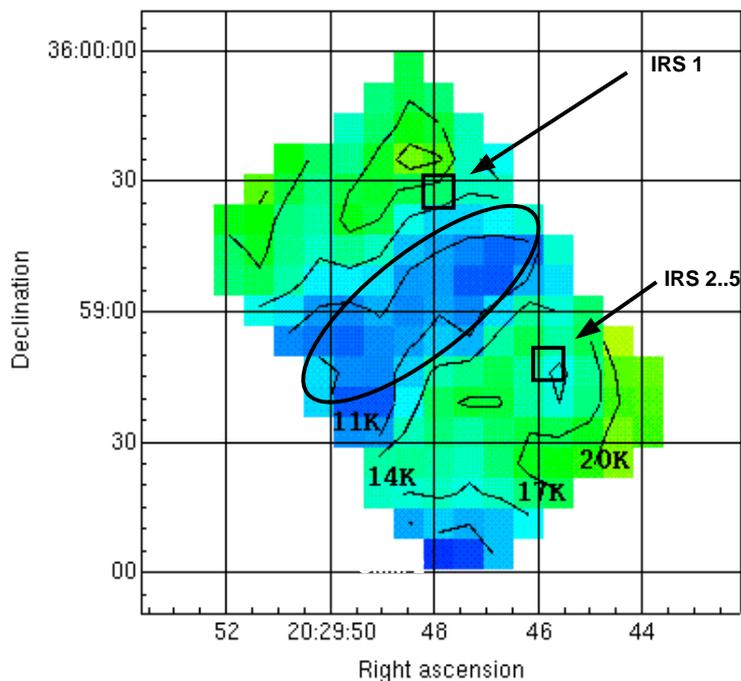


Abbildung 4.6: Die Verteilung der Farbtemperatur des Staubes im Bereich der Quelle FIR1. Blaue Farbtöne zeigen tiefe, gelbgrüne höhere Temperaturen an. Einzelne Isothermen sind angegeben. Im Zentrum der Wolke ist ein sehr kalter Kern ($T_d \sim 11$ K) zu erkennen. Der steigende Temperaturgradient in Richtung der nordöstlich und südwestlich gelegenen Quellen IRS1-5 weist auf eine externe Heizung dieses prä-protostellaren Gebietes hin. Die Farbtemperatur wurde aus dem Spektralindex zwischen $450 \mu\text{m}$ und $850 \mu\text{m}$, unter der Annahme eines Staubemissivitätsindex $\beta=2$ abgeleitet.

Ohne ein gutes Modell des Strahlungstransports ist es schwierig, ausschließlich aufgrund integraler Photometrie, die in großen Aperturen erhalten wurde, auf eine sehr kalte Staubkomponente zu schließen. Die hier vorliegenden räumlich aufgelösten Beobachtungen erlauben es jedoch, die Existenz einer solchen Komponente aus der in Abb. 4.6 gezeigten Karte der Farbtemperatur des Staubes in ISOSS J 20298+3559-FIR1 abzuleiten. Die Karte wurde aus den entfalteten $450 \mu\text{m}$ und $850 \mu\text{m}$ Messungen erhalten, die danach auf eine gemeinsame Auflösung von $14.9''$ (entsprechend der Hauptkeule bei $850 \mu\text{m}$) gebracht wurden. Die Farbtemperatur T_c wurde nach Gleichung 3.2 aus dem Flußverhältnis zwischen den Wellenlängen $\lambda_1 = 850 \mu\text{m}$ sowie $\lambda_2 = 450 \mu\text{m}$ berechnet. Als Emissivitätsindex wurde $\beta = 2$ angenommen. Es ist deutlich zu sehen, daß die Farbtemperatur zum Zentrum des Wolkenkerns hin abnimmt. Aus dem dort vorhandenen Strahlungsexzeß bei $850 \mu\text{m}$ (und 1.2 mm) folgt eine Temperatur von $T_c = 11 \pm 2$ K.

Änderungen der optischen Tiefe im Submillimeter-Bereich oder eine Änderung der Emissivität

des Staubes ($\beta < 2$) könnten ebenfalls Einfluß auf den Spektralindex haben. Im vorliegenden Fall sind diese Effekte jedoch von geringer Auswirkung und der Einfluß der Staubtemperatur auf den Spektralindex überwiegt: Die aus der $850 \mu\text{m}$ Messung in Richtung des Wolkenkerns abgeleitete maximale Säulendichte beträgt $N(\text{H}_2) = 2.2 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. Dies stimmt gut mit den Ergebnissen der Ammoniak-Beobachtungen überein (siehe folgender Abschnitt). Die daraus berechnete optische Tiefe beträgt $\tau_{850\mu\text{m}} = 2 \cdot 10^{-3} \ll 1$. Unter der Annahme einer ellipsoidalen Geometrie des Wolkenkerns von $0.55 \times 0.29 \text{ pc}^2$ Größe wie in Abb. 4.2 angedeutet, ergibt sich eine absolute Dichte molekularen Gases von $n(\text{H}_2) = 2 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$. Im Hinblick auf β sei bemerkt, daß ein nach innen abnehmender Temperaturverlauf auf eine Heizung von außen schließen läßt. Damit ähneln die physikalischen Bedingungen in dieser Hinsicht denen von sehr kalten, prästellaren Wolkenkernen kleinerer Masse, in denen ebenfalls $\beta=2$ gefunden wurde (z.B. Juvela et al. 2002, Ward-Thompson et al. 2002).

Gesamtmassen wurden aus der optisch dünnen Emission im Submillimeter-Bereich abgeleitet. Die Staubmasse ist nach Hildebrand (1983) durch Gl. 3.3 gegeben, wobei ein Opazitätskoeffizient des Staubes von $\kappa_{850\mu\text{m}} = 2.1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ benutzt wurde. Für die Konversion in die Gesamtmasse des Gases wurde gemäß Sodroski et al. (1997) ein Gas/Staub-Massenverhältnis von 150 angenommen. Damit ergibt sich für FIR1 eine Masse von $M(\text{H}_2) = 120 M_\odot \pm 24 M_\odot$. Der im kalten Kerngebiet gebundene Massenanteil beträgt $M(\text{H}_2) = 50 \pm 10 M_\odot$. Die im fernen Infrarot gemessene bolometrische Leuchtkraft stellt die Reemission kurzwelligerer Strahlung dar, die durch große Staubpartikel absorbiert wurde. Durch Integration über die Planck'sche Strahlungsverteilung ergibt sich für die Region eine Leuchtkraft von $L_{\text{FIR}} = 250 L_\odot$ bzw. $L_{\text{FIR}} = 15 L_\odot$ für den kalten Kernbereich.

4.3.5 Dichtes Gas im kalten Wolkenkern

Abb. 4.7 zeigt Ammoniak-Spektren, die am Ort des kalten Wolkenkerns aufgenommen wurden. Die Hauptkomponente des $(J,K)=(1,1)$ Inversionsübergangs konnte mit einem

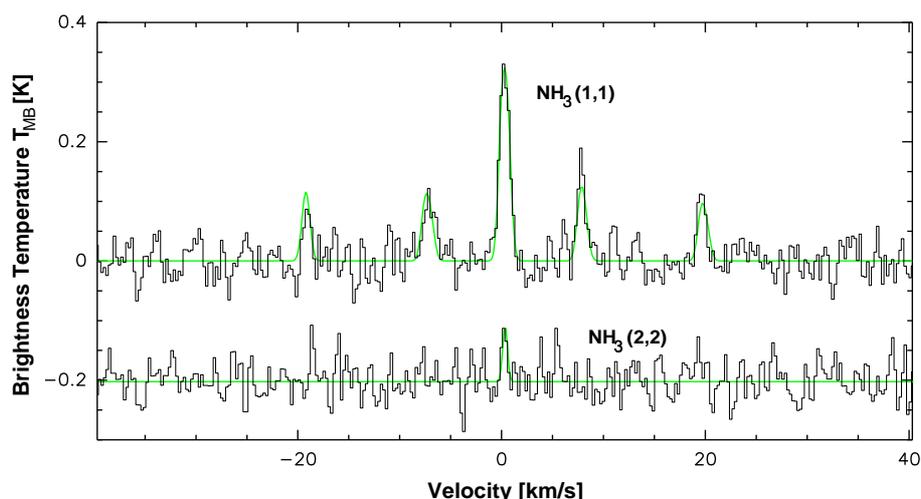


Abbildung 4.7: Mit dem Effelsberg 100m-Teleskop aufgenommene Ammoniak-Spektren am Ort des kalten Wolkenkerns (Tabelle 4.1) in ISOSS J 20298+3559. Oben ist der $(J,K)=(1,1)$, unten der $(2,2)$ Inversionsübergang gezeigt. Grün überlagert sind nach der χ^2 -Methode angepasste theoretische Linienprofile der Übergänge.

Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 11, die (2,2) Linie mit einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 3 nachgewiesen werden. Die Ammoniak-Beobachtungen erlauben es, die physikalischen Eigenschaften des dichten Gases mit aus dem thermischen Staub-Kontinuum abgeleiteten Werten zu vergleichen. Tab. 4.3 faßt die Ergebnisse der Messungen am Ort des Wolkenkerns zusammen.

Die optische Tiefe der $\text{NH}_3(1,1)$ Linie beträgt $\tau_{11} = 1.21 \pm 0.38$. Damit folgt aus dem Verhältnis zur (2,2) Linie eine Rotationstemperatur von $T_{12} = 14.0^{+3.0}_{-2.5}$ K und eine kinetische Gastemperatur von $T_{\text{kin}} = 14.7^{+4.0}_{-3.0}$ K. Dieser Wert stimmt im Rahmen der Meßfehler mit der über den Hauptkeulendurchmesser der Ammoniak-Beobachtungen gemittelten Staubtemperatur von $T_d = 12 \pm 2$ K (siehe Abb. 4.6) überein. Die abgeleitete Säulendichte des Ammoniaks wurde zu $N(\text{NH}_3) = 2.7^{+1.8}_{-1.1} \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ bestimmt. Die aus den Submillimeter-Beobachtungen erhaltene Säulendichte $N(\text{H}_2)$ ergibt nach Faltung auf die Auflösung des 100m-Teleskops eine effektive Säulendichte von $N(\text{H}_2) = 1.3 \pm 0.6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ für den in der Ammoniak-Beobachtung analysierten Bereich. Dies entspricht einer relativen Häufigkeit von $\chi(\text{NH}_3) = N(\text{NH}_3)/N(\text{H}_2) = 2.1 \cdot 10^{-8}$ und ist in Übereinstimmung mit einem Wert von $\chi(\text{NH}_3) \sim 2.6 \cdot 10^{-8}$, den Harju et al. (1993) aus der Beobachtung von 22 Ammoniakwolken im Orion abgeleitet haben.

Abb. 4.8 zeigt eine Konturkarte der integrierten Intensität des Ammoniak (J,K)=(1,1) Inversionsübergangs in der Umgebung der Ferninfrarotquelle. Es sind zwei Emissionsgebiete zu erkennen, die mit den Dunkelwolken C1 und C2 aus Abb. 4.3 assoziiert sind. Sowohl visuelle Extinktion (Tab. 4.2) als auch Ammoniak-Säulendichte (Tab. 3.2) sind in beiden Wolken vergleichbar. Obwohl sie von einem Schwenk der Zufallsdurchmusterung überfahren wurde, ist die südwestlich gelegene Wolke C2 nicht durch wesentliche Emission bei $170 \mu\text{m}$ auszumachen. Dies deutet auf eine niedrigere Staubtemperatur als in C1 hin. Das Strahlungsdefizit von C2 im Staubkontinuum bestätigt auch eine kürzlich von diesem Gebiet gewonnene $850 \mu\text{m}$ Karte (siehe Abb. 3.7).

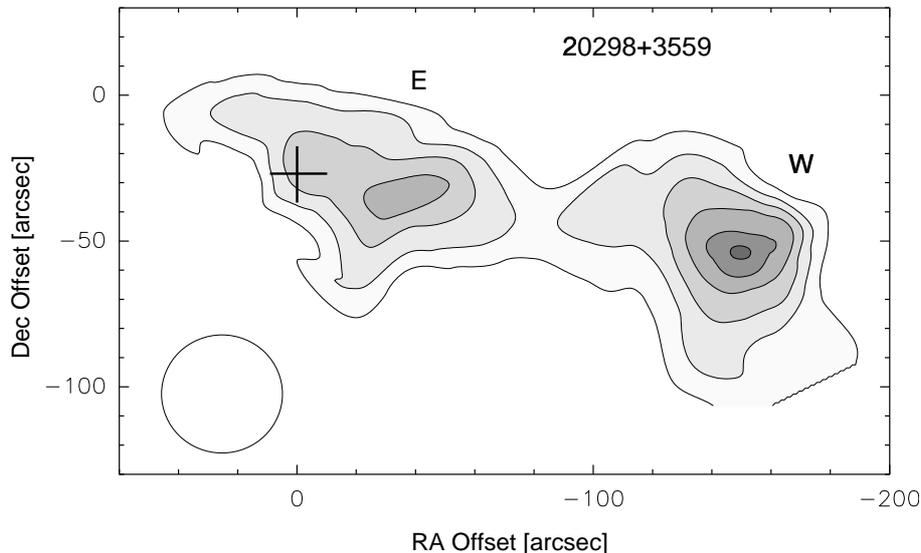


Abbildung 4.8: Karte der integrierten $\text{NH}_3(1,1)$ Intensität im Bereich $v_{\text{LSR}} = -2 \text{ km/s} \dots 2 \text{ km/s}$. Die gezeigten Konturlinien beginnen bei 0.2 K km/s und sind in Schritten von 0.12 K km/s erhöht. Der Hauptkeulendurchmesser ist unten links angedeutet, Koordinaten sind relativ zur Position der Infrarot-Quelle IRS1 gegeben. Das Zentrum des im Submillimeter-Bereich gefundenen kalten Wolkenkerns ist durch ein Kreuz markiert.

ISOSS J 20298+3559 befindet sich am südlichen Rand der Riesenmolekülwolke Cygnus X (Dame & Thaddeus 1985). Die Mehrheit aktiver und leuchtkräftiger Sternentstehungsregionen in dieser Molekülwolke befindet sich im Entfernungsbereich 1.2 bis 2.5 kpc (Odenwald & Schwartz 1993). Die zugehörigen Radialgeschwindigkeiten (LSR) betragen zwischen -10 km s^{-1} und $+10 \text{ km s}^{-1}$. Die gemessene Geschwindigkeit der Ammoniak-Linie von $v_{\text{LSR}} = 0.30 \pm 0.02 \text{ km s}^{-1}$ stimmt mit einer kinematischen Assoziation zur Cygnus X GMC überein.

Tabelle 4.3: Meßergebnisse der Ammoniakbeobachtung des kalten Wolkenkerns. Die Spalten bezeichnen von links: (1) Übergang, (2) Antennentemperatur der Hauptkomponente, (3) Radialgeschwindigkeit, (4) Linienbreite und (5) optische Tiefe.

Linie	T_{MB} K	v_{LSR} kms^{-1}	FWHM kms^{-1}	τ
(1,1)	0.330 (0.029)	0.297 (0.024)	0.87 (0.06)	1.210 (0.377)
(2,2)	0.093 (0.029)	0.234 (0.080)	0.56 (0.15)	

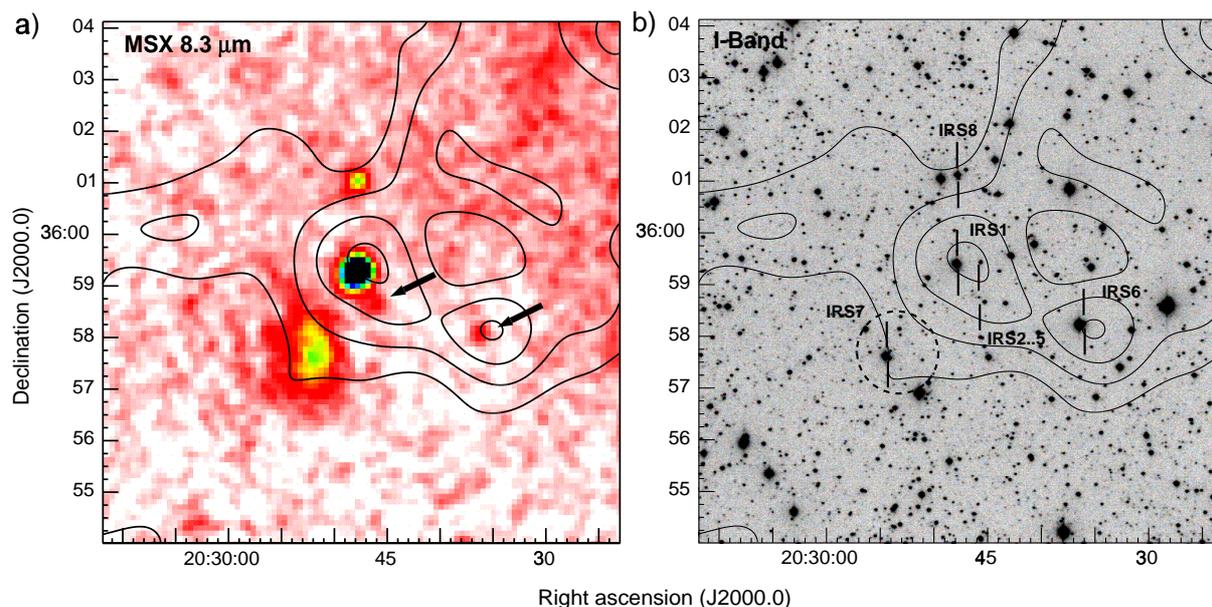


Abbildung 4.9: a) MSX-Aufnahme des Sternentstehungsgebietes bei $8.3 \mu\text{m}$. Überlagert sind Konturen visueller Extinktion (Konturen bei $A_V=1.5, 2.5, 3.5$ und 4.5 mag , vgl. Abb. 4.3). Die Emission im mittleren Infrarot ist durch Falschfarben im Bereich 5 bis $40 \text{ mJy pixel}^{-1}$ dargestellt. In der Region wurden vom MSX-Satelliten fünf Quellen mit einem Rauschabstand größer als 5σ nachgewiesen, zwei schwächere davon sind durch Pfeile gekennzeichnet. Bemerkenswert ist das in südöstlicher Richtung liegende, ausgedehnte Emissionsgebiet. Es kennzeichnet die Beleuchtung des äußeren Bereichs der Dunkelwolke durch den Stern IRS7. b) Aufnahme derselben Region im I-Band mit dem MPIA 0.7m-Teleskop. Auch hier sind zur Orientierung die Konturen visueller Extinktion überlagert. Die optischen Gegenstücke der MSX-Quellen aus a) sind gekennzeichnet.

4.3.6 Junge stellare Objekte im Wolkenkomplex

Beobachtungen im mittleren Infrarot sind gut geeignet, junge stellare Objekte zu finden, die in warmem zirkumstellarem Staub eingebettet sind. Ein bei $8.3 \mu\text{m}$ von MSX aufgenommenes Bild der im Rahmen der Extinktionsstudie untersuchten Region ist in Abb. 4.9a abgebildet. Vier kompakte und eine ausgedehnte Quelle wurden im MIR mit einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis größer 5 detektiert (Rauschpegel der Karte $\sigma \sim 15 \text{ mJy/beam}$). Die astrometrische Genauigkeit der MSX-Aufnahme ($\sim 2''$ RMS) erlaubt die Kreuzkorrelation mit Objekten der I-Band Aufnahme in Abb. 4.9b und dem 2MASS Punktquellen-Katalog. Alle vier kompakten MSX-Quellen stimmen in ihrer Position mit stark geröteten ($I-K_S = 5..7 \text{ mag}$) Gegenständen im nahen Infrarot überein. Tab. 4.4 faßt die Positionen und Flüsse der Quellen zusammen, wobei die $8.3 \mu\text{m}$ Flüsse mit Hilfe von Aperturphotometrie aus der MSX-Karte gewonnen wurde. Die photometrische Genauigkeit dieses Verfahrens beträgt 25 %, wie aus dem Vergleich mit MSX-Punktquellenflüssen abgeleitet werden konnte.

Tabelle 4.4: Mit dem Wolkenkomplex assoziierte NIR-Quellen. Die Spalten bezeichnen: (1) Objekt, (2) Position (3-6) Helligkeit in den Bändern IJHK_S, (7) Flußdichte bei $8.3 \mu\text{m}$, (8) Bezeichnung im 2MASS PSC, (9) Bemerkungen.

Quelle	Position [J2000] α, δ	I	J	H	K _S	$8.3 \mu\text{m}$ mJy	2MASS PSC	Bemerkungen
		mag						
IRS1	20:29:47.9 +35:59:26	12.90	10.98	9.45	8.15	1740	J2029479+355926	Herbig B2 Stern
IRS2	20:29:45.8 +35:58:47	17.23	14.70	13.01	11.95	90	J2029458+355847	hellstes Objekt der Gruppe IRS2..5
IRS3	20:29:46.1 +35:58:46	18.54	16.1*	14.3*	13.1*			JHK _S Flüße aus 2MASS-Karte
IRS4	20:29:46.1 +36:58:52	19.5	16.2*	13.85	12.25		J2029461+365852	J Fluß aus 2MASS-Karte
IRS5	20:29:46.4 +35:58:50	18.44	15.74	13.85	13.02		J2029464+355850	
IRS6	20:29:36.0 +35:58:18	15.77	13.33	11.83	10.73	75	J2029360+355818	
IRS7	20:29:54.5 +35:57:38	12.48	11.38	10.97	10.74	1870	J2029545+355738	MIR Nebel + beleuchtender Stern
IRS8	20:29:47.9 +36:01:08	13.09	9.78	7.94	6.98	225	J2029479+360108	Stern im Hintergrund

Für die starke Rötung der Objekte kommen zwei Mechanismen in Frage: Ein intrinsischer Strahlungsexzeß aufgrund der Anwesenheit warmen Staubes oder der Einfluß interstellarer Extinktion. Der Einfluß dieser beiden Effekte kann mit Hilfe eines (J-H) über (H-K_S) Zweifarben-Diagramms charakterisiert werden, das in Abb. 4.10 gezeigt ist. Die eingezeichneten Fehler in der Farbe von IRS1..8 sind aus den photometrischen Fehlern der 2MASS-Daten bestimmt. Die durchgezogene Kurve entspricht dem Ort nicht geröteter Sterne der Hauptreihe und des Riesenastes (Bessel & Brett 1988). Unter dem Einfluß interstellarer Extinktion verändert sich deren Ort im Zweifarben-Diagramm ausschließlich entlang des eingezeichneten Rötungsvektors. Alle Sterne mit normalen Photosphären, die ausschließlich aufgrund von Extinktion gerötet sind, befinden sich daher innerhalb des durch die beiden gestrichelten Linien gekennzeichneten Bereiches.

IRS1, IRS2, IRS3, IRS4, und IRS6 befinden sich außerhalb dieses Bereiches (rechts) und weisen daher einen intrinsischen Strahlungsexzeß im nahen Infrarot auf. Die beobachteten Farben entsprechen denen von Vor-Hauptreihensternen kleiner und mittlerer Masse mit zusätzlicher Extinktion von $A_V \lesssim 15 \text{ mag}$, wie sich durch den Vergleich mit dem überlagerten Ort von Herbig Ae/Be-Sternen (gestricheltes Parallelogramm, Hillenbrand et al. 1992) und T Tauri-Sternen (gestrichelte Linie, Meyer et al. 1997) im Diagramm zeigt. Der aus Abb. 4.10 abgeleitete Wert der Extinktion ist geringer als der aus dem $850 \mu\text{m}$ Staubkontinuum bestimmte Wert an der Position dieser Objekte von $A_V=18 \text{ mag}$ in Richtung IRS1 und $A_V=23 \text{ mag}$ in Richtung der

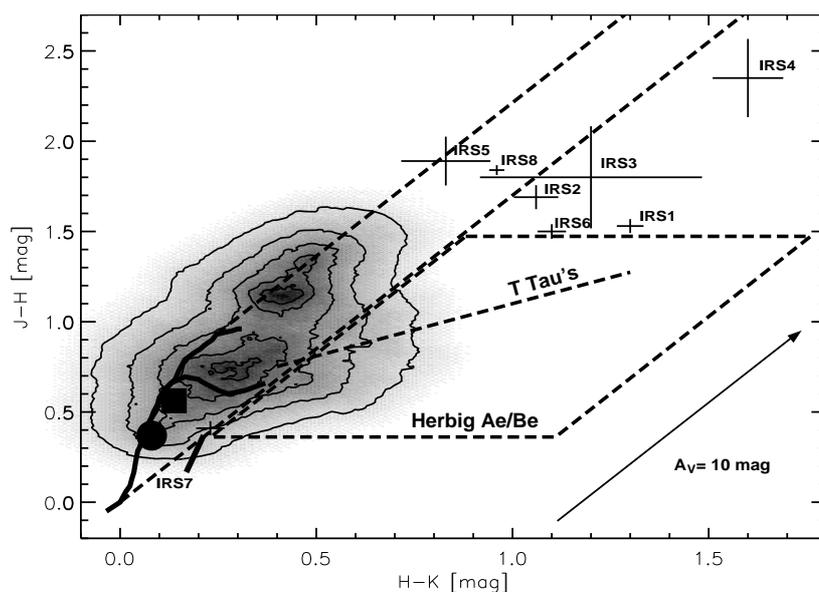


Abbildung 4.10: Zweifarben-Diagramm J-H über $H-K_S$ in Richtung der Dunkelwolke, konstruiert aus 2MASS-Daten. Die Anzahldichte von Feldsternen ist durch Konturen angedeutet. Die durchgezogene Linie in der unteren linken Ecke stellt die Orte ungeröteter Sterne der Hauptreihe und Riesensterne dar. Deren zugehöriger Rötungssektor befindet sich zwischen den beiden gestrichelten Linien. Einige der MSX-Objekte IRS1..8 zeigen einen für junge stellare Objekte typischen Infrarot-Exzeß und liegen im Bereich der Eigenfarben von Herbig Ae/Be und T Tauri Sternen. Der Rötungsvektor von Rieke & Lebofsky (1985) ist zum Vergleich dargestellt.

Gruppe IRS2, IRS3, IRS4 und IRS5. Alle diese Quellen stehen daher nicht unter dem vollen Einfluß der an ihrem Ort beobachteten integrierten Säulendichte des Staubes und sind daher entweder Vordergrundobjekte oder in den Dunkelwolkenkomplex eingebettet.

Die Positionsübereinstimmung kompakter Staubkondensationen in Abb. 4.2 mit den Quellen IRS1..5 läßt jedoch stark auf eine Assoziation mit der Dunkelwolke schließen: IRS1 befindet sich in einem Filament der Staubbemission im Nordwesten der kalten Quelle FIR1, die Position von IRS2 fällt mit der kompakten Submillimeter-Quelle SMM2 zusammen, die zudem von einer Gruppe bestehend aus mindestens 3 weiteren roten Quellen umgeben ist.

IRS5, IRS7 und IRS8 zeigen keinen NIR-Exzeß. Aus Abb. 4.10 folgt eine visuelle Extinktion von ca. $A_V \sim 15$ mag für IRS5 und IRS8. Die zugehörigen, entlang der gesamten Sichtlinie integrierten Extinktionswerte aus dem Staubkontinuum betragen 23 mag für IRS5 und 4.5 mag für IRS7 und IRS8, die sich am äußeren Rand der Wolke befinden. Dies läßt vermuten, daß auch IRS5 und IRS7 mit der Quelle der Zufallsdurchmusterung in Verbindung stehen, während IRS8 ein leuchtkräftiger Stern des Riesenastes im Hintergrund ist.

IRS7 befindet sich ungefähr im Zentrum eines Nebels im mittleren Infrarot (siehe Abb. 4.9a) Dieser Nebel am südöstlichen Rand der Dunkelwolke C1 deutet auf einen Beleuchtungsvorgang und Staubheizung der äußeren, im Optischen noch ausreichend transparenten Hülle der Wolke durch IRS7 hin. Die nach Westen ansteigende visuelle Extinktion verhindert dort weitere Staubheizung. Dies wird durch die Geometrie des Nebels, die dem Segment einer Kugelschale um IRS7 entspricht, unterstützt. Der MIR-Nebel und IRS7 stimmen mit der Quelle IRAS20279+3547 überein. Das Flußverhältnis $F_{12\mu\text{m}}/F_{25\mu\text{m}} > 1.4$ und die starke Emission im MSX 8.3 μm -Band, das eine starke Linie der PAHs enthält, deuten auf einen Reflektionsnebel

in der Umgebung eines B-Sterns hin. Heißere Sterne würden eine zusätzliche (und nicht detektierte) HII-Region erzeugen, spätere Spektraltypen sind in der Regel nicht von ausgeprägten Reflektionsnebeln im MIR umgeben. Um zu überprüfen, ob IRS7 als Zentralstern in Frage kommt, wurde BVRI-Photometrie dieser Quelle gewonnen. Die gemessenen Helligkeiten und Farben wurden mit den simulierten Werten von Hauptreihensternen verglichen, die durch einen variablen Anteil visueller Extinktion gerötet wurden. Die beste Übereinstimmung wurde mit der χ^2 -Methode für einen Spektraltyp B4..B6 und eine visuelle Extinktion von $A_V = 4.2 \pm 0.3$ mag gefunden. Dies paßt gut zu einem Wert von $A_V = 4.2 \pm 0.5$ mag für die visuelle Extinktion (einschließlich Vordergrund) aus der Extinktionskarte (Abb.4.3) in Richtung IRS7.

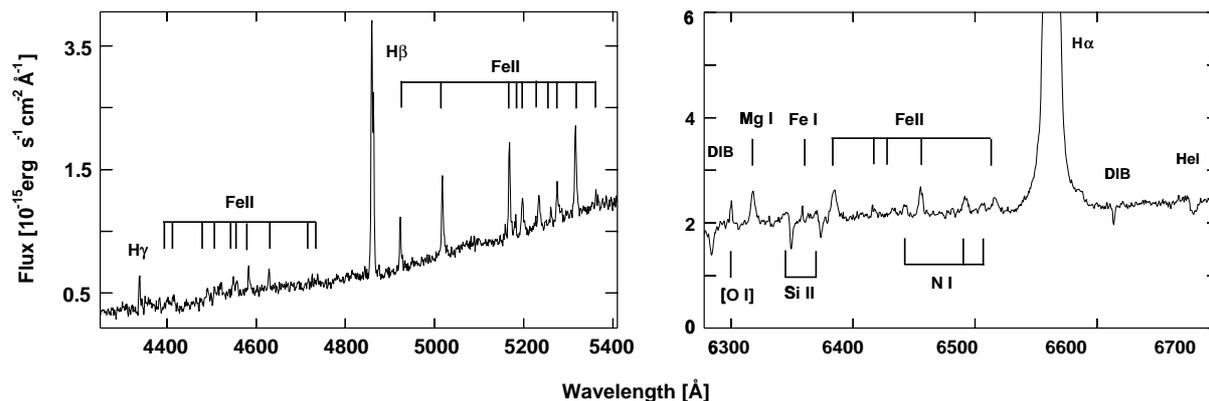


Abbildung 4.11: Optisches Spektrum des jungen stellaren Objektes ISOSS J 20298+3559-IRS1, aufgenommen mit dem TWIN-Spektrograph am 3.5m-Teleskop auf dem Calar Alto. Ein Spektraltyp B2 konnte aus photosphärischer Absorption von He I abgeleitet werden. Das Spektrum ist von intensiven Emissionslinien dominiert. Sie entstammen einer Region hoher Dichte, was durch die Anwesenheit erlaubter Linien von Fe II angedeutet wird.

4.3.7 Untersuchung des Herbig B2-Sterns IRS1

Um die aus dem thermischen NIR-Exzeß vermutete Vor-Hauptreihennatur der hellen Quelle IRS1 zu verifizieren, wurden optische Langspalt-Spektren (siehe Abb. 4.11) des Objektes angefertigt. Diese Spektren zeigen starke Emissionslinien von H I, Fe II, N I, Fe I, die alle charakteristisch für leuchtkräftige junge stellare Objekte sind (Cohen & Kuhui 1979). Eigenschaften der beobachteten Übergänge sind in Tab. 4.5 zusammengefaßt.

Mehrere Anzeichen deuten darauf hin, daß es sich bei der Quelle IRS1 um ein seltenes Beispiel eines Vor-Hauptreihensterns vom frühen Spektraltyp B handelt: Photosphärische He I Absorptionslinien konnten bei 6678 \AA und 7065 \AA nachgewiesen werden. Aus dem Vergleich ihrer Stärke mit theoretischen Vorhersagen für Stellaratmosphären von Auer & Mihalas (1973) läßt sich auf den Spektraltyp B2 ($T_{\text{eff}} = 20000 \pm 2500 \text{ K}$, $\log g = 4.0$) schließen. Dies ist mit dem Auftreten von Emissionslinien von Stickstoff (N I) vereinbar, die aufgrund ihres hohen Ionisationspotentials von 14.5 eV und der hohen Anregungsenergie der Übergänge ($\sim 10 \text{ eV}$) vor allem bei heißeren Be-Sternen beobachtet worden sind (Andrillat et al. 1988). Die relative Stärke der Linien von einfach ionisiertem gegenüber neutralem Eisen erfordert ein höher ionisiertes Emissionsgebiet als es typischerweise bei klassischen T-Tauri Sternen beobachtet wurde (Hamann & Persson 1992). Hier weisen Linien von Fe I oftmals die gleiche Stärke wie

Tabelle 4.5: Beobachtete Übergänge im optischen Spektrum von ISOSS J 20298+3559-IRS1. Die Spalten bezeichnen: (1) Übergang, (2) beobachtete Wellenlänge, (3) Äquivalentbreite, (4) Linienfluß. DIB (= diffuse interstellar band) bezeichnet ein nachgewiesenes interstellares Absorptionsband.

Linie	Wellenlänge [Å]	EW [Å]	Fluß [10^{-16} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$]
H α	6562.8	-200	1950
H β	4861.4	-19.9	99.8
H γ	4340.4	-5.2	15.2
HeI	6678.15	0.55	-13.8
HeI	7065.18	0.29	-8.5
FeII	4923.06	-2.8	19.2
FeII	5017.36	-3.5	19.2
FeII	5316.05	-4.3	48.3
FeII	5167.75	-3.4	33.4
FeI	6358.56	-0.2	4.8
MgI(+FeI)	6317.84	-1.3	26.8
DIB	6613.81	0.3	-6.5
NI	6442.02	-0.4	9.4
NI	6491.36	-0.8	16.9
NI	6505.58	-0.8	18.1

FeII auf. Um die Rotationsgeschwindigkeit von IRS1 aus den He I Absorptionslinien abzuleiten, wurde das stellare Linienprofil aus Auer & Mihalas (1973) mit der Verbreiterungsfunktion von Gray (1976) gefaltet. Die beste Übereinstimmung mit dem gemessenen Profil ergibt sich für eine Rotationsgeschwindigkeit von $v \sin(i) = 158 \pm 25$ km/s, ein typischer Wert, wie er bei Vor-Hauptreihensternen mittlerer Masse beobachtet wurde (Finkenzeller 1985). Deutlich ist auf optischen Aufnahmen der Palomar-Himmelsdurchmusterung ein kompakter Nebel um IRS1 im B- und R-Band zu sehen (Größe $15'' \times 8''$, Positionswinkel = 40°). Ein Langspalt-Spektrum des Nebels zeigt ein der Quelle IRS1 identisches Spektrum. Dies deutet auf einen Reflektionsnebel hin. Seine Anwesenheit und die Verbindung zur Dunkelwolke C1 machen das Emissionslinien-Objekt IRS1 per Definition zu einem Herbig Be-Stern (Herbig 1960). Ein Vergleich mit der Liste von Herbig Ae/Be Sternen von Thé et al. (1994) zeigt, daß nur etwa 20 solcher Objekte mit einem Spektraltyp B oder früher bekannt sind.

IRS1 (=MSX5C_G075.5314-01.8159) wurde vom MSX-Satelliten bei 8.3, 12.1 und 14.7 μm detektiert und ist im MSX Punktquellenkatalog aufgeführt (Egan et al. 1999). Die Quelle konnte dabei vom verhältnismäßig kleinen MSX Teleskop (FWHM $\sim 12''$) räumlich nicht aufgelöst werden. Um die Natur des thermischen Strahlungsexzesses von warmem Staub um IRS1 zu untersuchen, wurden beugungsbegrenzte Aufnahmen im mittleren Infrarot mit der MAX-Kamera am United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT) erhalten. In Verbindung mit einem Sekundärspiegelchopper am UKIRT zum Ausgleich atmosphärischer Turbulenz kann mit dieser Kamera eine räumliche Auflösung von $0.6''$ erreicht werden. Die Beobachtungen wurden in den Breitbandfiltern M, N und Q sowie mit Schmalbandfiltern an der 9.7 μm Silikatbande und zwei vom Erdboden beobachtbaren starken Emissionsbändern von PAH-Molekülen bei 8.7 und 11.3 μm durchgeführt.

Die Direktaufnahmen hoher räumlicher Auflösung zeigen die Anwesenheit einer kompakten Mittelinfrarotquelle bei IRS1. Ungefähr 80 % des Gesamtflusses stammen dabei von einer nicht aufgelösten Punktquelle (Größe $\lesssim 0.5''$ FWHM). Die in Abb. 4.12 dargestellte Aufnahme im PAH-Emissionsband bei 11.6 μm zeigt darüberhinaus ein schwaches Emissionsgebiet im Nor-

den der Punktquelle an. Optische Breitband-Photometrie in den Johnson-Bändern BVRI wurde zur Untersuchung der photosphärischen Energieverteilung von IRS1 durchgeführt. Tab. 4.6 faßt die durchgeführten Messungen von IRS1 im Optischen und mittleren Infrarot zusammen.

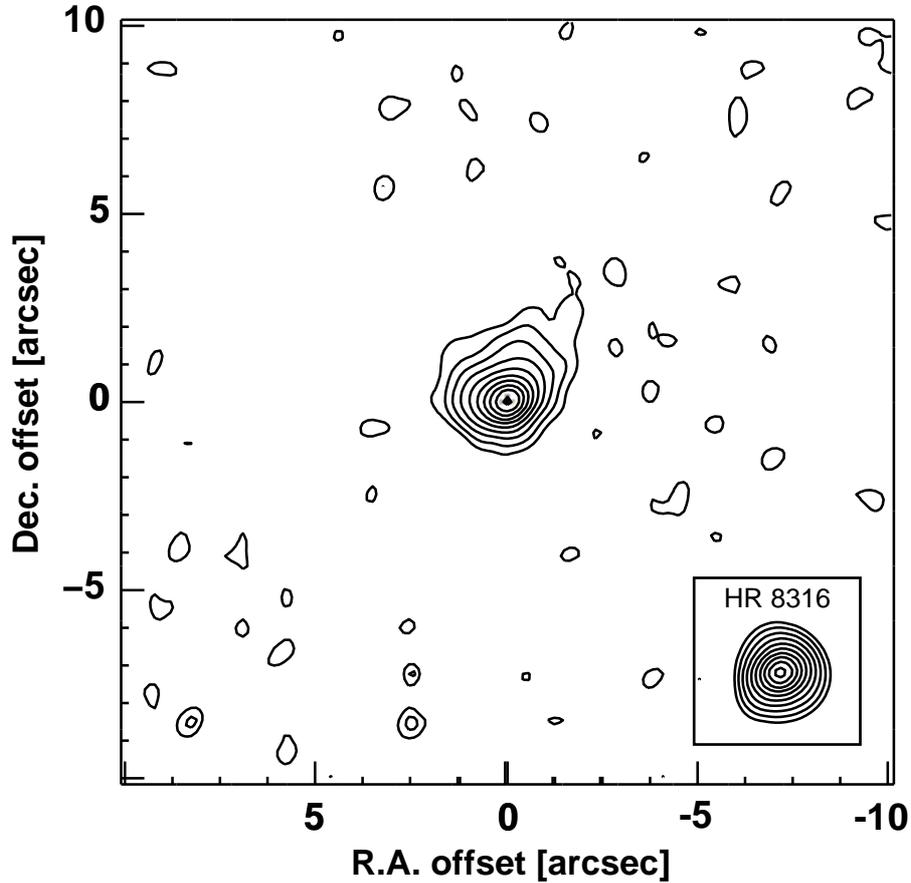


Abbildung 4.12: Beugungsbegrenzte Aufnahme des Herbig B2-Sterns IRS1 bei $11.6 \mu\text{m}$, erhalten in einem PAH-Schmalbandfilter mit der Mittelinfrarot-Kamera MAX am UKIRT. Der Großteil der Strahlung stammt von einer nicht aufgelösten, kompakten Quelle (Größe $\leq 0.5''$ FWHM). Ein schwächeres Emissionsgebiet ist im Norden zu erkennen. Zum Vergleich ist die Punktbildfunktion des Sterns HR 8316 gezeigt.

Tabelle 4.6: Photometrie von ISOSS J 20298+3549-IRS1 im Optischen und mittleren Infrarot. P8, P9 und P11 bezeichnen Schmalbandfilter im mittleren Infrarot (siehe Text). Alle Helligkeiten sind in Größenklassen angegeben.

Band	B	V	R	M	P8	S9	N	P11	Q
Helligkeit	17.3	15.7	14.5	5.7	3.9	4.1	3.7	3.1	2.6
σ	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

4.4 Diskussion

4.4.1 Hinweise auf einen prä-protostellaren Kern

Die durchgeführten Submillimeter-Beobachtungen in Richtung des Dunkelwolkenkomplexes erbrachten Hinweise auf einen dichten ($n(\text{H}_2) = 2 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$), sehr kalten ($T_d \sim 12 \text{ K}$) und kompakten ($R \sim 0.2 \text{ pc}$) Wolkenkern mit einem Temperaturgefälle zum Zentrum hin. Ähnliche Bedingungen wurden kürzlich aus Untersuchungen naher prä-protostellarer Kerne im fernen Infrarot abgeleitet (Juvela et al. 2001, Ward-Thompson et al. 2002) und werden als der ursprüngliche Zustand in Wolken angesehen, aus denen sich Sterne bilden. Die meisten solcher prä-stellaren Kerne sind jedoch von niedriger Masse. Könnte es sich bei FIR1 um ein seltenes Beispiel eines massereichen prä-protostellaren Kerns handeln? Selbst wenn davon ausgegangen wird, daß mehr als 50 % der anfänglichen Masse während der frühen Entwicklungsphasen der Sternentstehung durch unterschiedliche Prozesse wie Ausflüsse oder Strahlungsdruck verloren gehen, erscheint die Gesamtmasse dieses Kerns mit $M = 50 M_\odot$ ausreichend hoch, mindestens einen Stern vom späten Spektraltyp O oder frühen Typ B zu bilden.

Definitionsgemäß muß ein prä-protostellares Objekt durch die eigene Schwerkraft gebunden sein. Um den dynamischen Zustand des Kerns zu untersuchen, sei der Virialsatz betrachtet. Die Bedingung für einen durch Gravitation gebundenen Kern aus molekularem Gas ist

$$E_{\text{mag}} + E_{\text{pot}} = 2 \cdot (E_{\text{kin}} - E_{\text{ext}}), \quad (4.3)$$

wobei E_{mag} die magnetische Energie, E_{pot} die Gravitationsenergie, E_{kin} die gesamte Bewegungsenergie und E_{ext} den Energieinhalt aufgrund äußeren Gasdrucks bezeichnet. Es sei weiter angenommen, daß die Bewegungsenergie aus der thermischen Energie der Moleküle und der Energie ihrer ungeordneten Bewegung besteht:

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{therm}} + E_{\text{turb}} = \frac{3}{2} N k T + \frac{3}{2} M \sigma_{\text{turb}}^2 \quad (4.4)$$

Dabei gilt für 1-dimensionale Geschwindigkeitsverteilung $\sigma_{\text{turb}}^2 = \Delta V^2 / (8 \ln 2) - kT/m$, wobei ΔV die aus den Ammoniakmessungen bestimmte Linienbreite, m die Masse des Ammoniakmoleküls ist und T die kinetische Temperatur bezeichnet.

Für die potentielle Energie eines homogen ausgefüllten Ellipsoids gilt (Liljeström 1991)

$$E_{\text{pot}} = 3GM^2/5R \quad (4.5)$$

Der effektive Radius des Wolkenkerns beträgt $R = 0.2 \text{ pc}$.

Daraus folgt eine potentielle Energie von $E_{\text{pot}} = -6.4 \cdot 10^{37} \text{ J}$, eine thermische Energie $E_{\text{therm}} = 7.4 \cdot 10^{36} \text{ J}$ und eine turbulente Energie $E_{\text{turb}} = 2.0 \cdot 10^{37} \text{ J}$. Verglichen mit der potentiellen Energie macht die gesamte kinetische Energie 43 % aus.

Unter Vernachlässigung des externen Drucks auf die Wolke und des magnetischen Energieinhalts, für die im Moment keine Daten vorliegen, kann geschlossen werden, daß sich der kalte Kern im virialen Gleichgewicht befindet. Ob er kollabieren wird, entweder als Ganzes oder in Fragmenten, wird hauptsächlich vom turbulenten Geschwindigkeitsfeld abhängen. Weitere radiospektroskopische Beobachtungen geeigneter Linien sind nötig, um zu klären, ob ein solcher Kollaps bereits begonnen hat. Tab. 4.7 faßt physikalische Eigenschaften des kalten Wolkenkerns zusammen.

Tabelle 4.7: Physikalische Eigenschaften des kalten Kerns in ISOSS J 20298+3559.

Masse	50 ± 10	M_{\odot}
Staubtemperatur	12 ± 2	K
Größe	0.55×0.29	pc^2
Visuelle Extinktion A_V	30	mag
Säulendichte $N(\text{H}_2)$	$2.2 \cdot 10^{22}$	cm^{-2}
Dichte $n(\text{H}_2)$	$\sim 2 \cdot 10^5$	cm^{-3}
Gravitationsenergie	$6.4 \cdot 10^{37}$	J

4.4.2 Die Natur der Submillimeter-Quellen SMM1 und SMM3

Phänomenologisch können die jüngsten Protosterne (Objekte der Klasse 0) durch drei Eigenschaften charakterisiert werden (André et al. 1993):

1. Sehr geringe Emission für Wellenlängen $\lambda < 10 \mu\text{m}$.
2. Die spektrale Energieverteilung ähnelt der eines Schwarzen Körpers der Temperatur $T \sim 15\text{-}30$ K.
3. Das Flußverhältnis $L_{\text{submm}} / L_{\text{bol}}$ ist größer 5×10^{-3} , wobei L_{submm} die Leuchtkraft bei $\lambda > 350 \mu\text{m}$ bezeichnet.

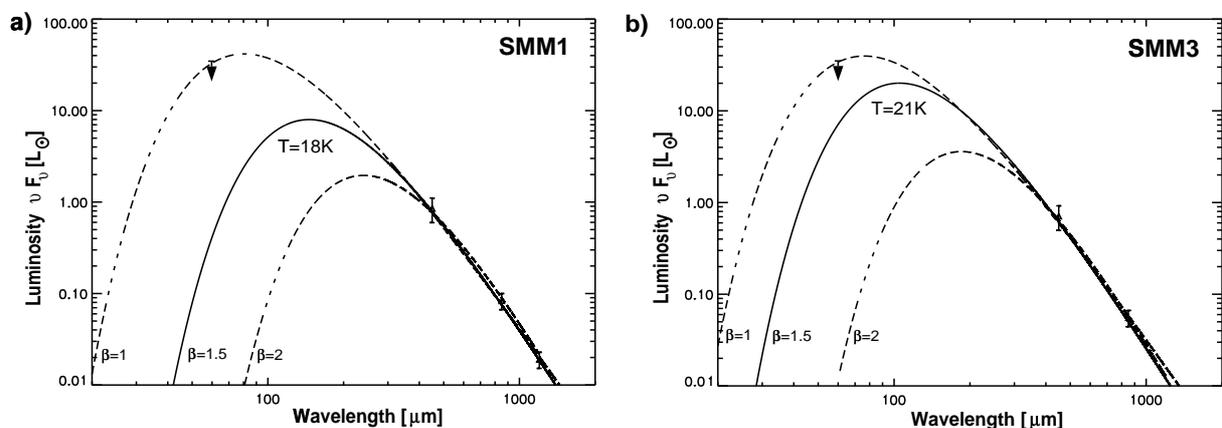


Abbildung 4.13: Spektrale Energieverteilung der kompakten Submillimeter-Quellen SMM1 und SMM3. Die Temperatur ist für eine Emissivität $\beta = 1.5$ angegeben (siehe Text für eine Diskussion dieses Parameters). Der Pfeil bezeichnet eine obere Grenze für den IRAS-Fluß bei $60 \mu\text{m}$.

SMM1 und SMM3 erfüllen diese Kriterien. Beide Quellen sind nicht im mittleren Infrarot detektiert, was sie zu Kandidaten der jüngsten protostellaren Objekte in der Umgebung von ISOSS J 20298+3559 macht.

Die spektralen Energieverteilungen von SMM1 und SMM3 sind in Abb. 4.13 gezeigt. Legt man ausschließlich die Photometrie im Submillimeter-Bereich zugrunde, können die SEDs beider Quellen durch modifizierte Schwarzkörperspektren mit Staubtemperaturen zwischen 10 und 38

K beschrieben werden. Die große Unsicherheit dieser Temperatur liegt zum großen Teil an der unbekanntem Emissivität des Staubes, die einen Bereich $1.0 < \beta < 2.0$ für derartige protostellare Objekte annehmen kann (Dent et al. 1998). Um die Staubemissivität zweifelsfrei festzulegen, sind zusätzliche Messungen am Maximum oder dem Wien'schen Teil der Energieverteilung nötig.

Im folgenden soll deshalb versucht werden, obere Grenzen für die Flußdichten von SMM1 und SMM3 bei $60 \mu\text{m}$ zu erhalten. Dazu sei der Gesamtfluß von FIR1 abzüglich des Flusses seiner größten Anteile betrachtet. Aufgrund der Konfusion mit großen Mengen verteilten kalten Staubes können die mit einem großem Gesichtsfeld durchgeführten Messungen von IRAS bei $100 \mu\text{m}$ und ISOPHOT bei $170 \mu\text{m}$ kaum für eine Flußabschätzung der zwei kompakten Quellen benutzt werden. Die niedrigsten oberen Grenzen für SMM1 und SMM3 können im IRAS $60 \mu\text{m}$ Band ermittelt werden. Der Fluß bei dieser Wellenlänge ist jedoch durch die Emission sehr kleiner Staubpartikel beeinflusst, die im Bereich des Reflektionsnebels des Herbig B2-Sterns IRS1 geheizt werden. Hinweise auf eine solche ausgedehnte Emission durch Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) und andere kleine Staubpartikel (VSG) gibt es auf der MAX-Direktaufnahme von IRS1 im mittleren Infrarot. Aufgrund des großen Gesichtsfeldes sind die Messungen von IRAS bei $12 \mu\text{m}$, $25 \mu\text{m}$ und $60 \mu\text{m}$ besonders empfindlich für eine solche ausgedehnte Staubkomponente.

Um den Beitrag der thermischen Strahlung kurzzeitig aufgeheizter ("transiently heated") PAH- und VSG-Teilchen in diesen Bändern zu bestimmen, wurde das Drei-Phasen Staub-Modell von Désert et al. (1990) verwendet. Nach Subtraktion der kompakten Emission von IRS1 gemäß eines Modells der zirkumstellaren Umgebung (siehe Abschnitt 4.4.3), wurden die relativen Anteile der Emission durch PAH- und VSG-Teilchen aus den Differenzflüssen bei $12 \mu\text{m}$ und $25 \mu\text{m}$ für das Strahlungsfeld einer stellaren Quelle mit einer Effektivtemperatur von $T_{\text{eff}} = 20000 \text{ K}$ bestimmt.

Es konnte so ein Anteil von $F_{60\mu\text{m}} = 7 \pm 3 \text{ Jy}$ vom Herbig-Stern IRS1 und seinem Reflektionsnebel zur gesamten Flußdichte von $F_{60\mu\text{m}} = 14 \text{ Jy}$ abgeleitet werden. Der verbleibende Beitrag von $F_{60\mu\text{m}} = 7 \text{ Jy}$ kann somit als obere Grenze für die beiden Submillimeter-Quellen zusammen angesehen werden.

Unter Berücksichtigung des möglichen Bereiches für den Staubemissivitätsindex $1.0 < \beta < 2.0$ wurden Massen von $3.7 M_{\odot} < M < 18 M_{\odot}$ für SMM1 und $2 M_{\odot} < M < 8 M_{\odot}$ für SMM3 bestimmt. Die entsprechenden bolometrischen Leuchtkräfte liegen im Bereich $36 L_{\odot} > L_{\text{bol}} > 1.8 L_{\odot}$ für SMM1 bzw. $34 L_{\odot} > L_{\text{bol}} > 3.3 L_{\odot}$ für SMM3. Geht man von einem mittleren Wert des Emissivitätsindex von $\beta \sim 1.5$ entsprechend dem Mittelwert einer Submillimeter-Durchmusterung von 73 jungen stellaren Objekten (Dent et al. 1998) aus, können für die beiden Quellen die folgenden Massen und Leuchtkräfte erhalten werden:

SMM1: $M = 8.0 M_{\odot}$, $L_{\text{bol}} = 7 L_{\odot}$, $T_{\text{d}} = 18 \text{ K}$;

SMM3: $M = 3.3 M_{\odot}$, $L_{\text{bol}} = 17 L_{\odot}$, $T_{\text{d}} = 21 \text{ K}$.

$L_{\text{submm}} / L_{\text{bol}} \gtrsim 1 \%$ gilt für jede Wahl von β im Bereich $1.0 < \beta < 2.0$. Dies macht SMM1 und SMM3 zu ausgezeichneten Kandidaten für Objekte der Klasse 0. Ein Beweis dafür, daß es sich bei SMM1 und SMM3 um Protosterne handelt, könnte durch Beobachtung molekularer Ausflüsse oder eine vorhandene Kontinuums-Quelle im cm-Bereich erbracht werden.

4.4.3 Hinweise auf Akkretion auf den sehr jungen Herbig B2-Stern IRS1

Der Herbig B2e-Stern IRS1 ist das leuchtkräftigste junge stellare Objekt, das im kalten Wolkenkomplex eingebettet ist. Ein solcher früher Entwicklungszustand von IRS1 folgt aus seinem Ort im Hertzsprung-Russel-Diagramm, siehe Abb. 4.14. Folgt man den Linien der Vorhauptreihenentwicklung von Palla & Stahler (1993), befindet sich die Quelle nahe der für eine Akkretionsrate von $\dot{M} = 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ berechneten stellaren Geburtslinie, entsprechend einem Stern mit einer Masse von $M_{\text{star}} = 6.5 M_{\odot}$ und einem Alter von weniger als 40000 Jahren unmittelbar nachdem er im Optischen sichtbar wurde.

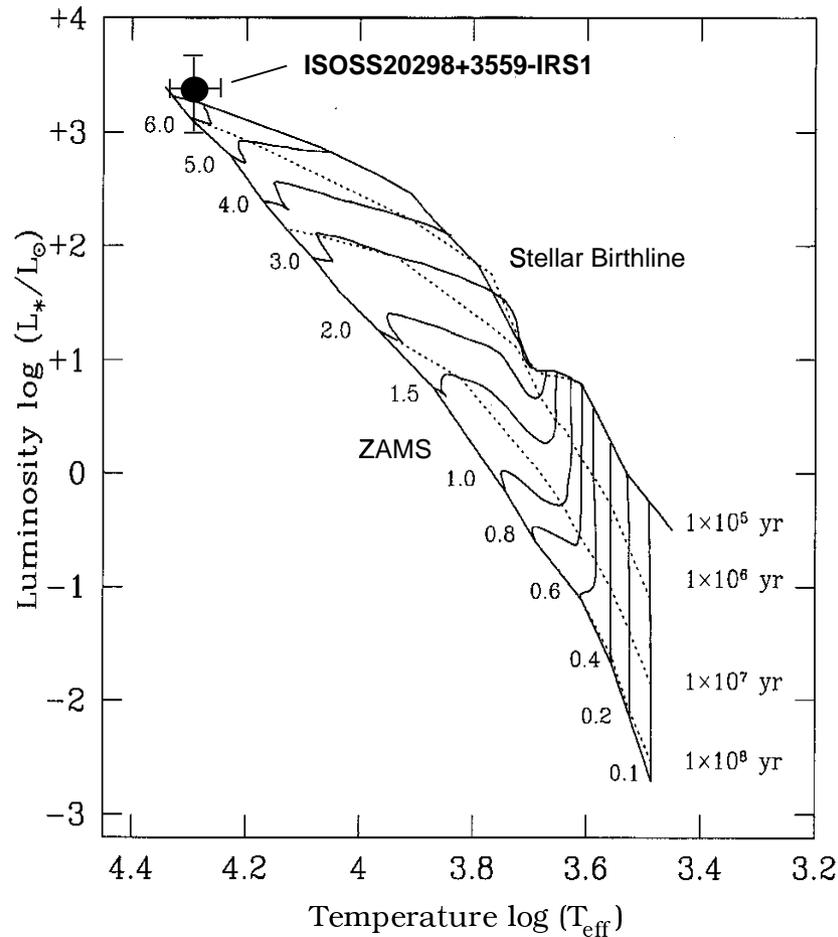


Abbildung 4.14: Hertzsprung-Russel-Diagramm der Leuchtkraft über der stellaren Effektivtemperatur, nach Palla & Stahler (1999). Die Massenwerte entlang der Hauptreihe (ZAMS) sind in Einheiten von M_{\odot} angegeben. Der Herbig B2-Stern IRS1 befindet sich nahe der stellaren Geburtslinie, die für eine Akkretionsrate von $\dot{M} = 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ berechnet wurde. Die überlagerten gestrichelten Linien der Vorhauptreihenentwicklung lassen auf ein Alter von weniger als 40000 Jahren schließen.

Die in Abb. 4.15 gezeigte Beobachtung inverser P Cygni-Profile mit asymmetrischen Linienkomponenten der Balmerlinien im Roten und Blauen deutet auf Masseeinfall in einem magnetosphärischen Akkretionsprozeß hin (Edwards et al 1994). Aus der rotverschobenen Absorptionskomponente der Übergänge Si II 6347.1 Å und Si II 6371.4 Å in Abb. 4.11 konnte eine Einfallsgeschwindigkeit von $110 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$ abgeleitet werden.

Die beugungsbegrenzten Direktaufnahmen im mittleren Infrarot zeigten in Verbindung mit der

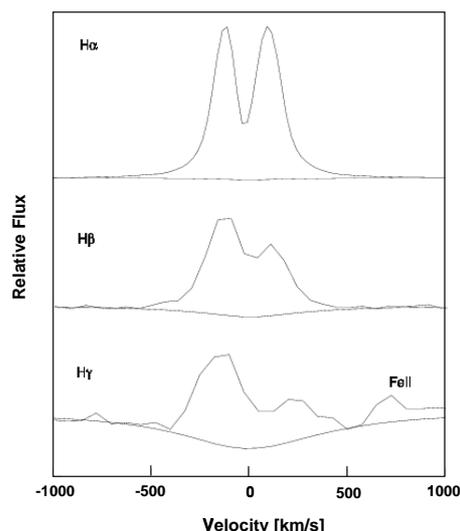


Abbildung 4.15: Profile der Balmer-Emissionslinien aus dem optischen Spektrum des Herbig Sterns IRS1 (siehe Abb. 4.11). Von oben nach unten sind $H\alpha$, $H\beta$ und $H\gamma$ gezeigt. Das photosphärische Kontinuum eines Sterns gleichen Spektraltyps ist zum Vergleich für jeden Übergang gezeigt. Zusätzlich zu einer starken Selbstabsorption im Linienkern ist der rote Linienanteil für die höheren Übergänge der Balmer-Serie zunehmend unterdrückt. Dies deutet auf Masseneinfall hin.

Photometrie im nahen Infrarot die Anwesenheit stark konzentrierten ($r \lesssim 250$ AU) warmen Staubes in unmittelbarer Nähe zu IRS1 an. Um die optische und infrarote Energieverteilung der stark geröteten Quelle IRS1 modellieren zu können, ist eine gute Bestimmung der Extinktion entscheidend. Basierend auf der Bestimmung der Effektivtemperatur aus den Beobachtungen photosphärischer He I-Linien wurde die Photosphäre durch eine Kurucz Modell-Atmosphäre mit $T_{\text{eff}} = 20\,000$ K beschrieben. Dabei wurde von solarer Metallizität ausgegangen. Die beobachtete Photometrie in den Bändern BVRI kann am besten durch Rötung aufgrund einer visuellen Extinktion von $A_V = 6.1 \pm 0.3$ mag wiedergegeben werden. Der Fehler stammt aus der Unsicherheit in der Effektivtemperatur. Unter der Annahme einer Entfernung von $d = 1.8$ kpc zur Dunkelwolke kann ein stellarer Radius von $R_* = 4 \pm 0.5 R_\odot$ aus der Oberflächen-Flußdichte des Kurucz-Modells abgeleitet werden. Die integrierte bolometrische Leuchtkraft der Photosphäre beträgt $L_* = 2200 \pm 600 L_\odot$.

Wie können die Beobachtungen von Akkretion und das Auftreten zirkumstellaren Staubes im Rahmen eines konsistenten Modells dieses äußerst jungen stellaren Objektes gedeutet werden? Abb. 4.16 zeigt die um den Einfluß interstellarer Extinktion korrigierte spektrale Energieverteilung von IRS1. Das im nahen Infrarot erkennbare Emissionsmaximum bei ungefähr $3 \mu\text{m}$ Wellenlänge ist charakteristisch für Herbig AeBe-Sterne. Es wurde durch eine zirkumstellare Scheibe mit einem inneren Loch (Hillenbrand et al. 1992), durch kugelförmige Hüllen (Hartmann et al. 1993) oder der Kombination aus beiden (Miroshnichenko et al. 1999) interpretiert. Während es mittlerweile als gesichert angesehen werden kann, daß Herbig Ae-Sterne von einer zirkumstellaren Scheibe, ähnlich denen von T Tauri-Sternen, während des größten Teils ihrer Vor-Hauptreihenphase umgeben sind (Natta et al. 2001), wurde bisher nur einer von sieben Herbig Be-Sterne durch Interferometrie im mm-Bereich detektiert (Natta et al. 2000). Ausgedehnte Halos und Hüllen im nahen (Leinert et al. 2001) und mittleren Infrarot (Prusti et al. 1994) wurden häufiger bei den massereicheren Herbig Be-Sternen beobachtet. Diese beobachteten Unterschiede könnten jedoch auf eine schnellere Entwicklung massereicherer Sterne und Un-

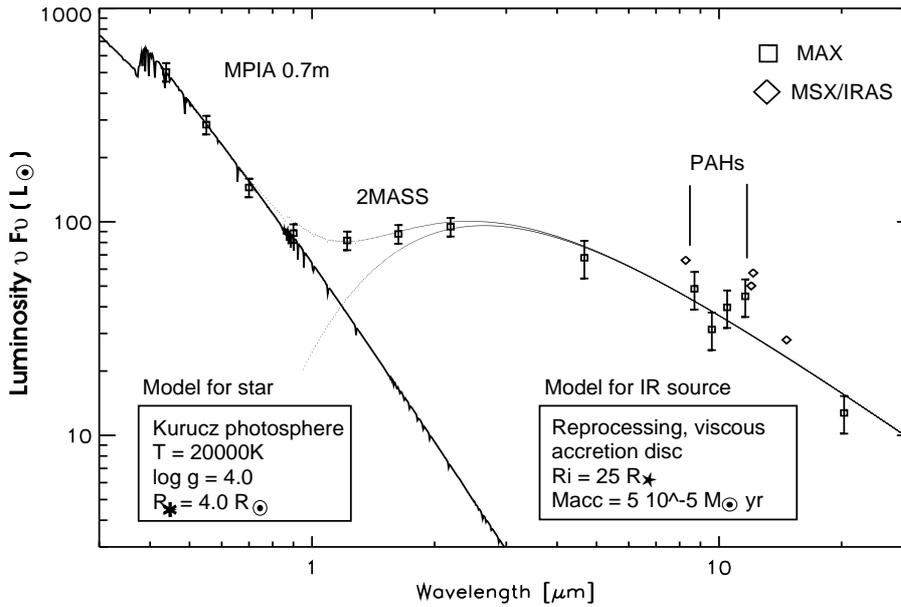


Abbildung 4.16: Spektrale Energieverteilung des Herbig B2-Sterns IRS1 im Optischen und Infraroten. Der starke Strahlungsexzeß im Infraroten wurde durch eine optisch dicke Akkretionscheibe modelliert. Der Stern wird durch eine Kurucz Atmosphäre mit $T_{\text{eff}} \sim 20000$ K ($\log g=4.0$) beschrieben. Die durchgeführten Beobachtungen mit dem MPIA 0.7m Teleskop im Optischen und der MAX-Kamera am UKIRT im thermischen Infrarot stimmen gut mit den Modellvorhersagen überein.

terschiede in der relativen Länge der Vor-Hauptreihenphase zurückzuführen sein. Dies macht es möglich und wahrscheinlich, daß Scheiben um frühe B-Sterne nur in den frühesten Phasen ihrer Entwicklung beobachtet werden können. Da die Zahl früher Herbig Be-Sterne jedoch klein ist (ein aktueller Katalog von Thé et al. (1994) führt 22 Objekte der Spektral-Typen B0-B5 auf), sind statistisch signifikante Schlüsse zur Beantwortung dieser Frage verfrüht.

Können die spektroskopischen Anzeichen von Akkretion und der thermische Strahlungsexzeß im Infraroten im Rahmen einer Akkretionscheibe um IRS1 gedeutet werden? Zur Beantwortung dieser Frage wurden spektrale Energieverteilungen einer aktiven Akkretionsscheibe einschließlich radiativer Heizung aufgrund Absorption der photosphärischen Strahlung von IRS1 berechnet. Als radiale Temperaturabhängigkeit einer solch optisch dicken, geometrisch dünnen Scheibe wurde dabei $T(r) = [T_{\text{acc}}(r)^4 + T_{\text{rad}}(r)^4]^{1/4}$ angenommen. Verwendet wurde eine Standard- α -Scheibe (Lynden-Bell & Pringle 1974). Ihr Temperaturprofil aufgrund Akkretion beträgt

$$T_{\text{acc}}(r) = \left[\frac{3GM_*\dot{M}}{8\pi\sigma r^3} \left(1 - \sqrt{\frac{R_*}{r}} \right) \right]^{1/4}. \quad (4.6)$$

Der Beitrag der photosphärischen Heizung zum Temperaturprofil beträgt

$$T_{\text{rad}}(r) = \left[\frac{2T_{\text{eff}}^4 R_*^3}{3\pi r^3} \right]^{1/4}. \quad (4.7)$$

Spektrale Energieverteilungen wurden für variierende innere Radien R_i der Scheibe und Akkretionsraten \dot{M}_{acc} berechnet. Wie in Abb. 4.16 zu sehen ist, deutet die Übereinstimmung der spektralen Energieverteilung des Stern/Scheibe-Modells mit den extinktionskorrigierten Beob-

achtungen von IRS1 auf eine staubige, optisch dicke Akkretionscheibe hin. Tab. 4.8 faßt die Parameter für das Modell des Systems zusammen.

Tabelle 4.8: Parameter des Herbig B2-Sterns IRS1 und seiner Akkretionsscheibe.

Masse	6.5 ± 1	M_{\odot}
Leuchtkraft	2200 ± 600	L_{\odot}
Effektivtemperatur	20000 ± 2500	K
Radius	4.0 ± 0.5	R_{\odot}
Visuelle Extinktion A_V	6.1 ± 0.3	mag
Alter	< 40000	yr
Rotationsgeschwindigkeit	158 ± 25	km/s
Innerer Radius	60.0	R_{\odot}
Akkretionsrate	5×10^{-5}	$M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$

Nun soll betrachtet werden, ob die Beobachtungen durch das Vorhandensein einer Hülle erklärt werden können: Die spektrophotometrischen Messungen von IRS1 im Schmalband-Filter der Silikat-Bande bei $9.7 \mu\text{m}$ zeigen eine schwache Absorption ($\tau_{9.7\mu\text{m}} \sim 0.2 \pm 0.1$), die nach Whittet et al. (1987) mit der entlang der Sichtlinie in Richtung der Quelle integrierten Extinktion übereinstimmt. Modelle sphärischer Hüllen um Herbig Be-Sterne, die die beobachteten spektralen Energieverteilungen erklären können, weisen alle eine ausgeprägte Silikat-Emission auf (Berilli et al. 1992, Miroshnichenko et al. 1997). Um das Ausbleiben von Silikat-Emission um einen B0-Stern zu erklären, müßte der innere Radius einer solchen Hülle mindestens 0.02 pc betragen (Natta et al. 2000). Dies ist jedoch nicht mit den hochaufgelösten Direktaufnahmen im mittleren Infrarot verträglich, die zeigen, daß der Großteil der Emission von IRS1 von einer unaufgelösten Quelle stammt, d.h. der Radius des Emissionsgebietes im MIR muß kleiner als 400 AU sein.

4.4.4 Effizienz der Sternentstehung

Im folgenden soll die Effizienz der Sternentstehung $\text{SFE} = M_{\text{stars}}/M_{\text{tot}}$ im Zentralbereich von ISOSS J 20298+3559-FIR1 abgeschätzt werden. M_{tot} schließt dabei die Masse der diffusen Komponente, des dichten Kerns und aller jungen stellaren Objekte ein. Die Massen der Quellen IRS2...5 im nahen Infrarot wurden aus der Beziehung zwischen Absolutelligkeit und Masse von Carpenter et al. (1993) bestimmt.

Bezüglich der Massen der Objekte der Klasse 0, SMM1 und SMM3 wurde davon ausgegangen, daß sie 50 % ihrer Hüllenmasse während der weiteren protostellaren Entwicklung verlieren werden (Bachiller 1996). Die Masse aller jungen stellaren Objekte ist dann $M_{\text{stars}} = 20 M_{\odot}$. Addiert man die Masse von Gas und Staub in FIR1 zu den stellaren Massen, ergibt sich $M_{\text{tot}} = 140 M_{\odot}$. Dies führt zu einer Effizienz der Sternentstehung von ungefähr 14 %.

Zum Vergleich: Die Effizienz der Sternentstehung beträgt ungefähr 2-9 % im Taurus-Komplex (Cohen & Kuhl 1979) und 1-9 % in Orion A+B (Carpenter 2000). ISOSS J 20298+3559-FIR1 weist damit mindestens die Effizienz dieser Sternentstehungsgebiete niedriger und hoher Masse auf.

4.5 Zusammenfassung

Es wurde eine detaillierte Untersuchung des in der ISOPHOT-Zufallsdurchmusterung entdeckten Sternentstehungsgebietes ISOSS J 20298+3559 durchgeführt. Die bei verschiedenen Wellenlängen durchgeführten Beobachtungen ergaben:

1. Das Sternentstehungsgebiet ist mit einem Komplex aus vier optischen Dunkelwolken C1...C4 assoziiert. Die gesamte Masse dieses Komplexes beträgt $760 M_{\odot}$.
2. Es konnte eine Entfernung von 1800 ± 300 pc auf der Grundlage einer optischen Ex-tinktionsuntersuchung bestimmt werden. Dies setzt die Sternentstehungsregion mit der Cygnus X Riesenmolekülwolke in Verbindung, in Übereinstimmung mit der Kinematik der gemessenen Moleküllinien.
3. Die kalte ISOSS-Quelle FIR1 entspricht dem dichten inneren Bereich der zentralen Dunkelwolke C1 und enthält eine Gesamtmasse von $120 M_{\odot}$ an Gas und Staub mit einer Durchschnittstemperatur von 16 K.
4. Zwei Kandidaten für Objekte der Klasse 0, SMM1 und SMM3, waren zu identifizieren. Die Quellen haben Massen von 8 bzw. $3.5 M_{\odot}$, was sie zu Vorläufern von Sternen mittlerer Masse macht.
5. Der von außen geheizte Wolkenkern von C1 hat eine Masse von $50 M_{\odot}$ bei einer Staubtemperatur von 11 K im Zentralbereich. Dort konnte Ammoniak-Emission nachgewiesen werden. Die Ammoniak-Messungen ergaben, daß das Objekt durch Gravitation gebunden ist. Dies macht es zu einem Kandidaten eines massereichen prästellaren Kerns.
6. Das leuchtkräftigste Objekt im Sternentstehungsgebiet ist der Herbig B2-Stern IRS1. Das Objekt hat eine Masse von $6.5 M_{\odot}$ und eine bolometrische Leuchtkraft von $2200 L_{\odot}$. Inverse P-Cygni-Profilen in den höheren Übergängen der Balmer-Reihe und in Si II deuten auf Akkretion hin. Die spektrale Energieverteilung kann gut durch ein Kurucz-Modell für die stellare Photosphäre sowie eine aktive und die photosphärische Emission re-prozessierende Akkretionsscheibe beschrieben werden. Das aus Modellen der Vorhauptreihen-Entwicklung abgeleitete stellare Alter beträgt weniger als 40000 Jahre.
7. Die Effizienz der Sternentstehung im dichten und kalten Bereich von FIR1 ist mit ungefähr 14 % vergleichsweise hoch.

Kapitel 5

Kalter Staub in leuchtkräftigen Galaxien

Es wurden spektrale Energieverteilungen einer Stichprobe von 40 leuchtkräftigen Galaxien der Zufallsdurchmusterung vom Optischen bis in den Millimeterbereich erstellt. Alle Quellen besitzen Infrarotleuchtkräfte $L_{\text{IR}} > 2 \cdot 10^{10} L_{\odot}$ und zeigen für Wellenlängen größer als $100 \mu\text{m}$ weiter ansteigende spektrale Energieverteilungen. Die aus dem Flußverhältnis $F_{170\mu\text{m}}/F_{100\mu\text{m}}$ bestimmte Farbtemperatur von $\lesssim 20$ K weist auf bisher unentdeckte große Mengen an kaltem Staub hin. Zur genauen Charakterisierung einer solchen kalten Staubkomponente wurden Nachfolgebeobachtungen im (Sub)millimeter-Kontinuum bei 450 und $850 \mu\text{m}$ mit Hilfe der Bolometerkamera SCUBA am James-Clerck-Maxwell-Teleskop und bei 1.2 mm mit MAMBO am IRAM 30 m Teleskop durchgeführt.

Die Messungen demonstrieren, daß die Ferninfrarotemission aller Objekte thermischer Natur ist. Zur konsistenten Beschreibung der Strahlung bei $\lambda > 60 \mu\text{m}$ ist jedoch ein isothermes Staubmodell nicht ausreichend - mindestens zwei Staubkomponenten sind erforderlich. Die kältere Komponente besitzt eine durchschnittliche Temperatur von 20 ± 3 K, die wärmere von 40 ± 6 K. Beide Temperaturen sind von der bolometrischen Leuchtkraft der Quelle unabhängig. Die abgeleiteten Staubmassen, die von der kalten Komponente dominiert werden, bewegen sich in der Größenordnung $10^{8 \pm 1} M_{\odot}$. Das aus Messungen von neutralem Wasserstoff abgeleitete Gas-zu-Staub-Massenverhältnis der Galaxien zeigt einen wohldefinierten Wert von 101 ± 52 , der in guter Übereinstimmung mit dem Wert unserer Milchstraße von ~ 140 steht.

Es zeigt sich, daß die Leuchtkraft der kalten Staubkomponente überraschenderweise besser mit nicht-thermischer Radio-Kontinuumsstrahlung korreliert ist als die der warmen. Dies deutet darauf hin, daß die Energiequellen leuchtkräftiger kalter Staubemission mit massereicher Sternentstehung in Verbindung stehen, und kalter Staub nicht ausschließlich durch das allgemeine interstellare Strahlungsfeld einer alten stellaren Population geheizt wird. Dies bestätigen räumlich aufgelöste Karten der Staubemission bei $450 \mu\text{m}$ und $850 \mu\text{m}$, die eine morphologische Übereinstimmung von kaltem Staub mit nicht-thermischer Radiostrahlung zeigen. Die tiefen Temperaturen und hohen Leuchtkräfte machen diese Klasse von Galaxien zu starken Strahlungsquellen im Submillimeter-Bereich, die bei der Interpretation von Submillimeter-Galaxien berücksichtigt werden sollten.

5.1 Einleitung

Staub spielt im Strahlungshaushalt von Galaxien eine fundamentale Rolle. Obwohl Staub weniger als 0.1 % der sichtbaren Gesamtmasse von Spiralgalaxien ausmacht, kann er einen signifikanten Teil des kurzwelligen Sternlichtes absorbieren und als Wärmestrahlung im Infra-

rotbereich (8-240 μm) wieder abgeben. In normalen Spiralgalaxien wie der Milchstraße trägt diese thermische Staubemission typischerweise bis zu 30 % der bolometrischen Leuchtkraft bei (Rieke & Lebofsky 1979, de Jong et al. 1984).

Die hohe Empfindlichkeit und der bis 240 μm reichende Spektralbereich haben es ermöglicht, mit dem ISO-Satelliten systematisch die Staubemission in Galaxien zu untersuchen. Räumlich aufgelöste Beobachtungen der nahen Spiralgalaxien M31 (Haas et al. 1998), M33 (Hippelein et al. 2003) oder NGC 6946 (Tuffs et al. 1996) zeigen, daß große Mengen Staub mit einer Temperatur $\lesssim 20$ K in mit Hilfe des IRAS-Satelliten durchgeführten Studien unentdeckt geblieben waren. Staub dieses Temperaturbereiches ist zu kalt, um in dessen langwelligsten 100 μm Band nachgewiesen werden zu können. Als Folge davon wurde aus IRAS-Beobachtungen geschlossen, daß die Staubemission in normalen Galaxien von ~ 30 K kalten Staubkörnern mit einem Gas-zu-Staub-Massenverhältnis von ~ 1000 stammt (siehe z.B. Devereux & Young 1993). Erst die Verfügbarkeit des Wellenlängenbereiches größer als 100 μm mit ISO hat zur Einbeziehung der kälteren und massereicheren Staubkomponente geführt. Dadurch konnte die Diskrepanz zu hoher Gas-zu-Staub-Verhältnisse aufgelöst und dargelegt werden, daß diese dem unserer Milchstraße sehr ähnlich sind.

Neben detaillierten Untersuchungen von Einzelobjekten konnten mit ISO auch statistische Aussagen über das Vorkommen von kaltem Staub getroffen werden. So finden Popescu et al. (2002) eine kalte Staubkomponente mit $T \sim 18$ K in nahezu allen Objekten einer vollständigen, optisch selektierten Stichprobe von Spiralgalaxien im Virgo-Galaxienhaufen. Mit ~ 1900 detektierten Galaxien stellt die Zufallsdurchmusterung die größte Datenbasis für Ferninfrarotflüsse extragalaktischer Quellen jenseits 100 μm dar. Stickel et al. (2000) fanden bei der statistischen Analyse einer ersten Galaxienauswahl von ISOSS-Galaxien, daß späte Spiralgalaxien generell kalten Staub mit $T \sim 15\text{-}25$ K aufweisen. Für Galaxien von kleinerer oder mit unserer Milchstraße vergleichbarer Leuchtkraft ($L_{\text{IR}} \lesssim 2 \times 10^{10} L_{\odot}$) stimmt dieses Ergebnis mit den zuvor angeführten Untersuchungen von Spiralgalaxien überein. Für solche Objekte wird üblicherweise angenommen, daß die kalte Staubkomponente vor allem von Regionen niedriger Dichte und niedriger Strahlungsintensität stammt und primär von alten Sternen geheizt wird. Für die Milchstraße schlossen Sodroski et al. (1994), daß die kalte Staubkomponente eng mit diffusen HI Wolken und Molekülwolken assoziiert ist, die den Ferninfrarot-Zirrus ausmachen, der von IRAS bei 100 μm entdeckt wurde (Low et al. 1984).

Eine Reihe von Galaxien im Katalog von Stickel et al. (2000) weist trotz Leuchtkräften von $L_{\text{IR}} \gtrsim 10^{11} L_{\odot}$ eine ansteigende spektrale Energieverteilung für $\lambda > 100 \mu\text{m}$ auf. Infrarot-Galaxien befinden sich oftmals in einem Ausbruch massereicher Sternentstehung, wie etwa die klassische und nächstgelegene Galaxie mit einem Sternentstehungsausbruch (engl. Starburst) M82 (Rieke et al. 1980), deren Staubtemperatur ~ 45 K beträgt. Starburstgalaxien besitzen hohe Verhältnisse zwischen Infrarot- und Blauleuchtkraft, wobei $L_{\text{IR}} / L_{\text{B}} > 1$ gilt. Die Entdeckung solcher optisch schwachen Galaxien, die einen Großteil ihrer Energie im Infraroten abstrahlen (Soifer et al. 1984), stellt eine der herausragenden Ergebnisse der IRAS-Himmelsdurchmusterung dar. Während Infrarotgalaxien überhaupt zu den leuchtkräftigsten Quellen im Universum gehören, stellen sie außerdem unter allen Galaxien mit $L > 10^{11} L_{\odot}$ die vorherrschende Population im lokalen Universum (Sanders & Mirabel 1996). Das lokal stärkere Strahlungsfeld hat besonders in ultraleuchtkräftigen Infrarotgalaxien (ULIRGS mit $L > 10^{12} L_{\odot}$) oftmals höhere Staubtemperaturen ($T \sim 45$ K) zur Folge, als vom allgemeinen interstellaren Strahlungsfeld geheizter Staub in normalen Galaxien ($T \sim 30$ K). Zusätzlich kann heißer Staub ($T \sim 100$ K) im Torus eines zentralen aktiven galaktischen Kerns für intensive Strahlung vom mittleren bis in das na-

he Infrarot beitragen. Das Auftreten großer Mengen kalten Staubes in solchen Quellen hoher Infrarot-Leuchtkraft ist überraschend.

In einer detaillierten Studie von 41 LIRGS und ULIRGS finden Klaas et al. (2001) ausnahmslos fallende spektrale Energieverteilungen im Bereich $\lambda > 100 \mu\text{m}$ mit einem Maximum in der Gegend von $80 \mu\text{m}$. Dies stimmt mit der Modellvorstellung solcher Quellen überein, wonach die thermische Strahlung hauptsächlich vom warmen Staub in Starbursts stammt. Eine zusätzliche kalte Staubkomponente, die mit $T \sim 10\text{-}20 \text{ K}$ gefunden wurde, trägt nur zu einem kleinen Teil der Leuchtkraft bei. Solche warmen ULIRGS des lokalen Universums werden üblicherweise als Standardquellen bei der Interpretation von Submillimeter-Galaxien verwendet. Die Existenz kalter leuchtkräftiger Galaxien hat wichtige Implikationen für die Interpretation solcher Objekte.

In diesem Kapitel wird die systematische Suche nach leuchtkräftigen, von einer kalten Staubkomponente dominierten ISOSS-Galaxien beschrieben und deren Staubemission untersucht. Zur genauen Charakterisierung einer solch kalten Staubkomponente sind zusätzliche Messungen auf dem Rayleigh-Jeans-Ast in Kombination mit der ISOSS-Photometrie am Maximum der thermischen Emission erforderlich, die für eine Zufallsstichprobe von 40 Quellen durchgeführt wurden.

5.2 Auswahlkriterien der ISOSS-Stichprobe

Die systematische Identifikation kalter leuchtkräftiger Galaxien in der Zufallsdurchmusterung erfordert zusätzlich zur ISOSS $170 \mu\text{m}$ -Photometrie die Kenntnis von Entfernung und spektraler Energieverteilung für $\lambda < 170 \mu\text{m}$.

Meßdaten dieser Art liegen homogen für alle in der IRAS-Himmelsdurchmusterung im 60 und/oder $100 \mu\text{m}$ Band detektierten Galaxien bekannter Rotverschiebung vor. Die optische Identifikation von IRAS-Quellen aus dem Point Source Catalogue (Beichman et al. 1988) sowie dem Faint Source Catalogue (Moshir et al. 1992) mit Galaxien einschließlich der Messung deren spektroskopischer Rotverschiebung gelang im Rahmen zeitaufwendiger Beobachtungsprogramme während der letzten zwei Jahrzehnte (z.B. QDOT von Rowan-Robinson et al. 1990, PSCz von Saunders et al. 2000, sowie Fisher et al. 1995, Klaas & Elsässer 1993). Auf diesen Vorarbeiten aufbauend war es möglich, aus den extragalaktischen Datenbanken NED (NASA Extragalactic Database) und LEDA (Paturel 1989) die Ferninfrarot-Photometrie im Bereich $12\text{-}100 \mu\text{m}$ sowie die Entfernung von mehr als 21000 IRAS-Galaxien zu extrahieren. Aufgrund seiner empfindlichen Nachweisgrenze von $F_{60\mu\text{m}} = 0.2 \text{ Jy}$ ist vor allem der Faint Source Catalogue selbst zum Nachweis verhältnismäßig kühler (und daher im $60 \mu\text{m}$ Band leuchtschwacher) Galaxien an der Nachweisgrenze der Zufallsdurchmusterung geeignet. Dies bestätigte der ISOSS Minisurvey von Stickel et al. (1998b). Es kann davon ausgegangen werden, daß der überwiegende Teil von im ISOSS detektierten Galaxien auch in den Punktquellenkatalogen PSC/FSC auftaucht.

Der IRAS-Galaxienkatalog wurde auf Positionsübereinstimmung mit kompakten ($\text{FWHM} < 2.5'$) Quellen der Zufallsdurchmusterung kreuzkorreliert, die in mindestens 2 Detektorpixeln mit einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis größer 5 nachgewiesen wurden. Um für Nachfolgebeobachtungen ausschließlich Quellen hoher Zuverlässigkeit zu berücksichtigen, mußte besonders auf die Vermeidung von Quellenkonfusion mit galaktischem Infrarot-Zirrus geachtet werden.

Da dieser bei einer Farbtemperatur von 18 K (Lagache et al. 1998) besonders stark im ISOSS-Band emittiert, führt die höhere räumliche Auflösung von ISOSS im Vergleich zu IRAS zum Nachweis einer erhöhten Zahl kompakter Zirkus-Kondensationen. Stickel et al. (2002) schätzen, daß bei der von ihnen durchgeführten automatisierten Quellenextraktion von 325000 gefundenen Objekten mehr als 90 % derartige kompakte Zirkus-Knoten sind. Es wurden daher nur Himmelsbereiche mit einer galaktischen Breite $|b| > 20^\circ$ sowie niedriger galaktischer Hintergrundemission $I_{100\mu\text{m}} < 15 \text{ MJy/sr}$ berücksichtigt.

Insgesamt konnten in dieser Kreuzkorrelation und mit anschließender visueller Kontrolle ~ 500 Galaxien gefunden werden, deren Positionen im Rahmen der Meßgenauigkeit beider Durchmusterungen (Abstand $< 3'$) übereinstimmen. Diese ISOSS/IRAS-Stichprobe stellt eine besonders zuverlässige Galaxienauswahl der Zufallsdurchmusterung dar und schließt einen Großteil der Objekte des ISOSS-Galaxienkatalogs von Stickel et al. (2000) ein. Sie umfaßt jedoch nur eine Teilmenge des vollständigen Galaxienkatalogs der Zufallsdurchmusterung, der auch ausschließlich optisch identifizierte Objekte umfaßt (Stickel et al. 2003).

Die schließlich mit den Bolometerkameras beobachteten Objekte mußten weitere Rahmenbedingungen erfüllen:

- Sichtbar für SCUBA ($15\text{h} < \text{RA} < 6\text{h}$, $-25^\circ < \text{Dec} < 65^\circ$) und MAMBO ($0\text{h} < \text{RA} < 24\text{h}$, $\text{Dec} > -15^\circ$)
- Kompakte Quellen für SCUBA (optischer Durchmesser $D_{25}^1 < 2.4'$) und MAMBO ($D_{25} < 0.5'$)

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, daß, obwohl ISOSS und IRAS flußlimitierte Stichproben zur Verfügung stellen, die hier vorgestellte Objektauswahl nicht im Hinblick auf Vollständigkeit in Bezug auf eine gegebene Helligkeit getroffen wurde. Hauptziel war es, die Eigenschaften kalter leuchtkräftiger Galaxien mittels einer repräsentativen Menge zu untersuchen. Erste statistische Ergebnisse zum gesamten ISOSS-Galaxienkatalog weisen jedoch darauf hin, daß Objekte mit den hier gefundenen Eigenschaften keine Einzelfälle sind, sondern einen deutlichen Anteil von Quellen mit $L_{\text{IR}} > 2 \times 10^{10} L_\odot$ ausmachen. Dies macht die vorliegende Auswahl zu einer repräsentativen Stichprobe kalter und kompakter Galaxien der ISOPHOT Zufallsdurchmusterung.

Die Effizienz der eingesetzten Kriterien zur Auswahl der Galaxien läßt die Korrelation mit anderen Himmelsdurchmusterungen erkennen: Obwohl kein explizites Auswahlkriterium, war in allen Fällen innerhalb eines Suchradius von $30''$ um die FSC-Position eine Radiokontinuumsquelle aus NVSS zu finden. Die Wahrscheinlichkeit für eine zufällige Assoziation innerhalb dieses Radius beträgt weniger als 6×10^{-4} (Langston et al. 1990). Alle Positionen dieser Radioquellen stimmten wiederum innerhalb ihrer Meßfehler von $\sim 1.5''$ mit Nahinfrarot-Quellen aus 2MASS überein. Dies bestätigt, daß die gewählten Kriterien sehr gut für die Auswahl von Galaxien geeignet waren.

Tab. 5.1 faßt die Auswahlkriterien zusammen.

¹Durchmesser entsprechend der Flächenhelligkeit $B = 25 \text{ mag arcsec}^{-2}$

Tabelle 5.1: Auswahlkriterien für die Stichprobe kalter leuchtkräftiger Galaxien

1	IRAS-Galaxie bekannter Rotverschiebung
2	$L_{\text{IR}} > 2 \times 10^{10} L_{\odot}$ und $F_{170\mu\text{m}} > F_{100\mu\text{m}}$
3	galaktische Breite $ b > 20^\circ$
4	Flächenhelligkeit $I_{100\mu\text{m}} < 10 \text{ MJy/sr}$
5	kompakt (FWHM $< 2.5'$)
6	sichtbar für SCUBA & MAMBO

5.3 Beobachtungen

5.3.1 SCUBA Submillimeter-Kontinuums Beobachtungen

Beobachtungen bei $450 \mu\text{m}$ und $850 \mu\text{m}$ wurden am 28. und 29. Juli 2001 mit der Bolometerkamera SCUBA (Holland et al. 1999) am James-Clerck-Maxwell Telescope (JCMT) auf dem Mauna Kea (Hawaii) durchgeführt. Um die Staubemission der ausgedehnteren Quellen vollständig zu erfassen, wurde im Jiggle-Modus gemessen, der mit 64 Rasterpunkten räumlich vollständig abgetastete Karten mit einem Gesichtsfeld von $2.4'$ ermöglicht. Durch Verwendung eines dichroischen Strahlteilers können beide Wellenlängen gleichzeitig aufgenommen werden. Die durchschnittliche Beobachtungszeit pro Objekt betrug ~ 35 min. Je nach Ausdehnung der Galaxie variierte der verwendete Chopperhub des Sekundärspiegels zwischen $60''$ und $120''$. Der Positionswinkel zwischen Quelle und Referenzposition wurde parallel zur kleinen Achse des optischen Helligkeitsprofils gewählt. Als Kalibrationsquellen dienten Mars, Uranus und CRL618. Die Beobachtungen erfolgten unter stabilen und trockenen atmosphärischen Bedingungen. Die aus der Opazität bei $850 \mu\text{m}$ ($\tau_{850\mu\text{m}} = 0.185 \pm 0.2$) bestimmte integrierte Säulenhöhe des Wasserdampfs betrug 0.7 mm .

Die Auswertung der Messungen erfolgte mit dem Programmpaket SURF (SCUBA User Reduction Facility, Jenness et al. 1998). Ein wesentlicher Aspekt bei der Auswertung von Submillimeter-Daten stellt die Korrektur von Extinktion durch die Erdatmosphäre dar. Für den am Teleskop empfangenen Strahlungsfluß F gilt: $F = F_0 \cdot \exp(-A\tau)$, wobei F_0 den Fluß außerhalb der Atmosphäre, A die Luftmasse der Beobachtungen und τ die atmosphärische Opazität bezeichnet. Da selbst unter den für Mauna Kea sehr guten Bedingungen die atmosphärische Opazität im Zenit beträchtlich ist ($\tau_{450\mu\text{m}} \sim 1$), hängt die photometrische Genauigkeit der Daten entscheidend von der Messung der Opazität ab. Sie wurde kontinuierlich aus Radiometerdaten ermittelt, die in zeitlichen Intervallen von 10 s in Sichtrichtung des JCMT aufgenommen wurden. In regelmäßigen Abständen ($\sim 2 \text{ h}$) wurden diese Messungen anhand sogenannter "Skydips" mit SCUBA überprüft. Das angewendete Verfahren ist in Rohlfs & Wilson (2000) beschrieben.

5.3.2 MAMBO 1.2 mm-Messungen

Kontinuums-Beobachtungen bei 1.2 mm Wellenlänge wurden am 23. und 24. Oktober 2001 mit dem IRAM 30m-Teleskop auf dem Pico Veleta (Spanien) mit der 37-Kanal Bolometerkamera

MAMBO (Kreysa et al. 1998) durchgeführt. Die photometrische Kalibration erfolgte mit Hilfe der primären Eichquellen Mars und Neptun. Die vermessene Winkelauflösung (Durchmesser der Hauptkeule) des 30m-Teleskops bei dieser Wellenlänge beträgt $10.5''$. Die Bestimmung der atmosphärischen Opazität geschah in regelmäßigen Abständen (~ 2 h) durch Skydips. Aufgrund der guten atmosphärischen Transmission während der Messungen ($\tau_{1.2\text{mm}} = 0.12-0.31$) wurde eine Nachweisempfindlichkeit von typischerweise 5 mJy/beam (4σ) nach 30 min Integrationszeit erreicht. Der Rauschpegel σ_0 wurde dabei aus den Referenzbolometern abgeleitet, die nur atmosphärische Emission empfangen. Die durch wiederholte Beobachtungen der Kalibrationsquellen gemessene systematische Kalibrationsgenauigkeit σ_{cal} beträgt 20% . Der gesamte Meßfehler der Photometrie folgt damit aus $\sigma^2 = \sigma_0^2 + \sigma_{\text{cal}}^2$.

Alle Beobachtungen wurden im On-Off Modus an der Zentralposition der Quellen vorgenommen. Der zentrale Bolometerkanal wurde dazu auf das aus optischen (USNO), Nahinfrarot (2MASS) bzw. Radiodaten (FIRST) abgeleitete zentrale Helligkeitsmaximum der Galaxien positioniert. Der astrometrische Fehler der verwendeten Kataloge ist kleiner als $2''$ RMS und damit besser als die Positionsgenauigkeit des 30m-Teleskops. Die hohe Winkelauflösung des 30m-Teleskops hat zur Folge, daß sich der 1.2 mm-Fluß ausgedehnter Galaxien auf eine Vielzahl von einzelnen Bolometerkanälen verteilt und daher schwierig nachzuweisen ist. Es wurden daher bei 1.2 mm ausschließlich die entferntesten und damit kompaktesten Galaxien der Stichprobe beobachtet, deren erwartete Ausdehnung nur knapp über der Größe der Hauptkeule liegt. Leider steht am IRAM 30m-Teleskop kein vollbeweglicher Sekundärspiegel zur Verfügung, der räumlich vollständig abgetastete Karten hoher Empfindlichkeit wie die sog. "Jiggle-Maps" bei SCUBA ermöglichen würde. Einzig eine kontinuierliche Abtastung des Gesichtsfeldes entlang von Zeilen ist möglich. Solche räumlich vollständig abgetasteten Karten sind On-Off Messungen prinzipiell in der Bestimmung des integralen Flußes überlegen. Atmosphärische Fluktuationen, die bei On-Off Messungen gut korrigiert werden können, haben bei diesem Verfahren jedoch starke Auswirkungen. Die durch Kontrollmessungen an der hellen Quelle UGC 10468 verifizierte Nachweisempfindlichkeit von 10 mJy/beam der Scans reichte zur Kartierung der Objekte nicht aus.

5.3.3 ISOPHOT Daten

Die direkte Messung der Quellengrößen im Submillimeter-Bereich erlaubten es, bei der Flußbestimmung aus den Schwenkdaten (siehe Kapitel 2) die üblicherweise freie Halbwertsbreite der den Beam repräsentierenden Gaussfunktion festzuhalten. Die überwiegende Zahl der beobachteten Objekte sind demnach für ISO Punktquellen, entsprechend einer Halbwertsbreite $\text{FWHM} = 1.95'$ in ISOSS. Für Galaxien, die nur in 2 Pixeln detektiert wurden oder für die aufgrund der Orientierung des Schwenks keine wohldefinierte Quellenposition ermittelt werden konnte, wurde die Submillimeter-Position angenommen. Einige Galaxien konnten in unterschiedlichen, voneinander unabhängigen Schwenkmessungen nachgewiesen werden. Die aus diesen redundanten Messungen ermittelte relative photometrische Meßgenauigkeit des $170\ \mu\text{m}$ Flußes beträgt $\Delta F_{170\mu\text{m}} / F_{170\mu\text{m}} \sim 30\%$. Zur Berücksichtigung eines möglichen systematischen Unterschieds zwischen den photometrischen Systemen von ISOPHOT und IRAS (Tuffs et al. 2002) wurde für die IRAS-Daten eine Kalibrationsgenauigkeit von 15% angenommen.

5.3.4 HI-Messungen und optische Direktaufnahmen

Ergänzende Beobachtungen zu Tab. 5.2 konnten im Rahmen von Direktorenzeit am Radioobservatorium Effelsberg und dem Deutsch-Spanischen Astronomischen Zentrum auf dem Calar Alto erhalten werden.

Die HI Emission von UGC 11023 wurde am 25. September 2003 mit dem 100m-Teleskop in Effelsberg gemessen. Die Daten wurden mit dem Programmpaket CLASS reduziert. Optische Direktaufnahmen in den Breitbandfiltern Johnson B, V und R von einer Reihe kalter ISOSS-Galaxien konnten im Juni 2001 am Spanischen 1.5m-Teleskop auf dem Calar Alto gewonnen werden. Die optischen Daten wurden mit IRAF-Standardprozeduren reduziert.

5.3.5 JHK (2MASS) und 21 cm-Kontinuum (VLA) Daten

Der Two Micron All Sky Survey (2MASS, Cutri et al. 2000) enthält Photometrie aller Galaxien der ISOSS-Stichprobe. Als Helligkeit in J, H und K wurde der innerhalb der Isophote $K=20$ mag/arcsec² integrierte Gesamtfluß entnommen.

Mit Hilfe des Very Large Array (VLA) wurden im Laufe des letzten Jahrzehnts zwei große Himmelsdurchmusterungen im 21 cm-Kontinuum durchgeführt. Der NRAO VLA Sky Survey (NVSS, Condon et al. 1998) durchmusterte in der D-Konfiguration entsprechend einer Winkelauflösung von 45'' den gesamten Himmel nördlich einer Deklination von -40° . Die Nachweisgrenze des NVSS beträgt $F_{21\text{cm}} \sim 3$ mJy. Photometrie aus dem NVSS liegt für alle Galaxien der Stichprobe vor und erlaubt die Bestimmung der Intensität der nicht-thermischen Strahlungskomponente. 21 cm Kontinuumsbeobachtungen einer deutlich höheren räumlichen Auflösung von 6'' wurden mit dem VLA im Rahmen der FIRST-Durchmusterung (Becker et al. 1995) erhalten. Diese für einen Teil der ISOSS-Galaxien vorliegenden Daten sind hervorragend geeignet, um die Morphologie der nicht-thermischen Emission zu charakterisieren.

5.4 Ergebnisse

Tab. 5.2 faßt die Ergebnisse der (Sub)mm-Beobachtungen neben weiteren im folgenden benötigten Literaturdaten zusammen. Insgesamt 40 Galaxien konnten bei 450/850 μm bzw. 1.2 mm beobachtet werden. 31 Quellen wurden mit einem Signal-zu-Rauschverhältnis > 3 in mindestens einem dieser Bänder nachgewiesen (15 mit SCUBA, 16 mit MAMBO). Die Detektionsrate beträgt 78 % und ist bezogen auf die Helligkeit der Quellen hoch (der durchschnittliche Fluß der nicht detektierten Quellen ist $F_{100\mu\text{m}} \sim 2.3$ Jy, verglichen mit $F_{100\mu\text{m}} \sim 12$ Jy im SCUBA-Survey leuchtkräftiger Galaxien von Lisenfeld et al. (2000) mit 74 % Detektionsrate).

Die abgeleiteten Flüsse wurden im Falle der räumlich aufgelösten 450/850 μm Daten innerhalb des optischen Durchmessers D_{25} integriert, entsprechend der Isophote $B = 25$ mag arcsec⁻². Dies gilt auch für die Abschätzung der oberen Flußgrenze (3σ) für die Galaxie UGC10123, die als einzige bei den SCUBA-Beobachtungen nicht detektiert wurde. Die angegebenen Flüsse und Flußgrenzen (Signal-zu-Rauschverhältnis von 3) der MAMBO-Beobachtungen bei 1.2 mm gelten für den Raumwinkel der Teleskop-Hauptkeule. Dies setzt voraus, daß die Winkelausdehnung der Staubemission kleiner als die der Hauptkeule ist. Die Gültigkeit dieser Annahme soll im folgenden Abschnitt überprüft werden.

Tabelle 5.2: Meßwerte für die Stichprobe von 40 kalten leuchtkräftigen Galaxien. Die Spalten bezeichnen: (1) gebräuchlichster Name, (2-3) Position, (4) Helligkeit im B-Band aus LEDA, (5-7) Helligkeit im NIR aus 2MASS, (8-9) IRAS/FSC-Photometrie, (10) ISOSS-Photometrie, (11-12) SCUBA-Photometrie, (13) MAMBO-Photometrie, (14) Helligkeit im 21 cm-Kontinuum aus NVSS, (15) integrierter HI-Linienfluß aus Huchmeier & Richter (1989), (16) Radialgeschwindigkeit, (17) optische Klassifikation aus NED und LEDA. Nach den Submm-Beobachtungen erfolgte Verbesserung in der ISOSS-Kalibration führten bei einigen Quellen zu Veränderungen im 170 μ m Fluß.

Name	Position	α	δ	B	J	H	K	F ₆₀	F ₁₀₀	F ₁₇₀	F ₄₅₀	F ₈₅₀	F _{1.2 mm}	F _{21 cm}	S _{HI}	V	Klassifikation
	[J2000]				mag	mag	mag	Jy	Jy	Jy	Jy	Jy	mJy	Jy cm	Jy km/s	km/s	
ESO 473-G006		00:15:22.71	-24:03:34.7	15.26	12.62	11.92	11.56	1.04	2.26	5.00	<255	35	<4.83	11.15		7572	Sab
UGC 148		00:15:51.27	+16:05:23.2	14.17	11.70	10.95	10.64	2.21	5.04	3.60	<1370	68		11.1	11	4213	Sbc
UGC 165		00:17:41.78	+24:40:02.0	15.13	12.61	11.78	11.42	0.90	2.35	3.95	492	46		10.63	3.8	6047	Sab
ESO 539-G008		00:21:37.41	-19:40:42.8	15.51	12.49	11.71	11.32	1.80	3.71	6.10	264	33		18.01		7255	E
IRAS 01056-1200		01:08:12.68	-11:44:01.6	16.98	14.72	13.99	13.49	1.01	2.40	2.80			<4.83	13.15		22035	Sbc
UGC 1871		02:25:04.60	+22:13:02.1	14.81	11.50	10.66	10.20	3.70	8.76	9.75	525	70		45.61	2.9	10121	Sbc
MCG -3-13-51		05:01:32.57	-16:09:57.9	13.83	11.00	10.23	9.91	0.95	3.01	5.58	<656	52		10.87	4.9	6640	Sb
NGC 2076		05:46:47.46	-16:46:57.4	13.41	9.84	8.98	8.59	6.70	19.88	29.00	2440	350		58.88	30.7	2142	E
Mk 73		07:31:44.30	+63:14:35.5	14.95	12.44	11.67	11.37	3.19	3.73	1.20			4.53	16.41		4447	E?
IRAS 10078+2904		10:10:42.49	+28:50:12.0	16.32	14.11	13.27	12.76	0.64	0.95	1.37			<4.38	3.41		10031	
IRAS 10134+2230		10:16:11.66	+22:15:35.2	16.31	13.80	13.12	12.56	0.98	1.74	2.30			<4.38	6.86		19569	
IRAS 10187+0624		10:21:24.17	+06:09:44.6	16.19	13.43	12.58	12.02	0.85	1.96	1.96			3.42	8.84		21901	
IRAS 11491+4845		11:51:46.21	+48:28:31.3	16.74	13.47	12.65	12.16	0.58	1.43	0.88			3.14	7.11		16298	
UGC 7179		12:10:58.05	+63:54:52.4	14.06	10.96	10.17	9.81	2.91	7.86	7.44			7.91	22.20		2670	Sb
CGCG 315-049		12:35:42.01	+37:18:37.0	15.30	12.07	11.28	10.91	1.54	3.90	4.17			6.51	15.87		10832	S0
NGC 4868		13:46:55.05	-02:46:06.5	18.45	15.97	15.48	14.86	0.33	0.76	0.72			4.17	1.15		4665	Sab
IRASF 13443-0231		13:56:00.88	+58:31:47.1	16.52	13.66	12.84	12.36	1.12	2.56	2.50			<5.25	10.30		31315	
IRAS 13543+5846		14:28:59.59	+60:50:00.5	16.20	12.94	12.18	11.72	1.91	3.46	2.67			9.99	9.68		11963	Sc
IRAS 14276+6103		14:28:59.63	+23:11:29.4	14.82	11.67	11.01	10.68	1.54	3.65	3.91			6.12	12.71	1.38	5247	E
NGC 5637		15:07:58.51	+72:47:38.6	19.20	15.58	15.12	14.10	0.54	1.66	2.00			16.40	5.78		3556	Sc
IRAS 15080+7259		15:15:03.25	+42:02:59.4	12.50	9.62	8.99	8.67	3.41	10.66	22.00	3710	430		42.80	17.2	2562	Sbc
NGC 5899		15:59:02.76	+51:18:16.2	15.01	11.29	10.45	10.07	1.44	4.49	6.80	<1130	<233		18.45	17.5	3706	Sab
UGC 10123		16:06:32.96	+53:26:31.9	17.34	14.25	13.33	12.68	0.72	2.18	2.66			5.89	10.04		26110	
IRAS 16052+5334		16:33:23.57	+47:18:38.8	17.50	14.54	13.81	13.12	0.60	1.12	1.16			<5.82	70.41		34866	
IRAS 16319+4725		16:36:06.88	+44:36:11.0	17.34	14.27	13.33	12.93	1.00	2.75	4.75	1189	109		12.74		9221	Sc
UGC 10468		16:43:05.68	-00:38:50.5	14.31	13.28	12.59	12.02	2.29	4.62	5.17			8.52	22.42		12874	Sc
CGCG 025-001		17:01:22.03	+05:17:00.9	15.58	12.76	11.99	11.54	1.86	3.44	4.34			<3.93	29.36	0.93	14917	Sa
CGCG 053-024		17:08:45.65	+62:02:35.4	15.46	12.40	11.60	11.23	2.96	5.14	3.24			7.70	10.82		7856	Sbc
CGCG 299-056		17:19:31.78	+62:16:47.2	16.81	14.69	13.53	12.93	0.44	1.29	1.16			4.35	5.00		24053	Sb
IRAS 17190+6219		17:48:38.34	+51:09:26.0	13.92	10.82	10.08	9.79	1.42	5.07	8.50	<1223	100		22.76	7.4	6776	Sc
NGC 6478		17:59:05.56	+66:16:05.0	15.67	14.60	14.07	14.07	0.20	<0.65	0.68			<5.10	<3.00			
IRASF 17590+6616		17:57:10.64	+27:57:41.1	14.53	11.06	10.26	9.88	3.02	7.05	10.56	1100	169		16.05	<4.0	4621	Sa
UGC 11060		18:06:05.86	+46:21:28.0	16.59	13.73	12.93	12.42	0.74	1.79	1.90			7.34	8.38		14169	
IRAS 18047+4621		18:12:56.37	+55:05:03.0	16.37	13.67	12.91	12.45	1.27	2.35	2.36			<7.29	7.26		17415	
IRAS 18119+5504		18:16:52.86	+65:41:10.9	17.02	13.84	12.96	12.28	1.02	2.50	2.54			4.06	13.16		14167	Sbb
IRAS 18167+6539		19:16:10.57	+60:25:02.8	14.77	11.85	11.12	10.79	0.58	2.77	4.00				7.49		11784	Sbb
NGC 6787		20:32:50.22	+09:55:35.1	12.93	9.90	9.14	8.80	1.79	5.96	14.39	1258	125		16.62	7.0	4707	Sbab
NGC 6928		21:20:17.49	-01:41:03.6	14.75	11.40	10.49	10.05	1.86	5.37	14.15	1043	264		20.50	6.0	4899	Sb
UGC 11723		22:25:09.46	-06:30:13.6	17.00	14.31	13.49	13.05	0.79	1.61	1.94			<4.35	6.40		26770	HII
IRAS 22225-0645		22:25:46.62	-13:09:59.0	14.29	11.77	11.02	10.72	1.10	2.82	4.52	518	47		10.21		9572	Sb

5.4.1 Morphologie der Staubemission

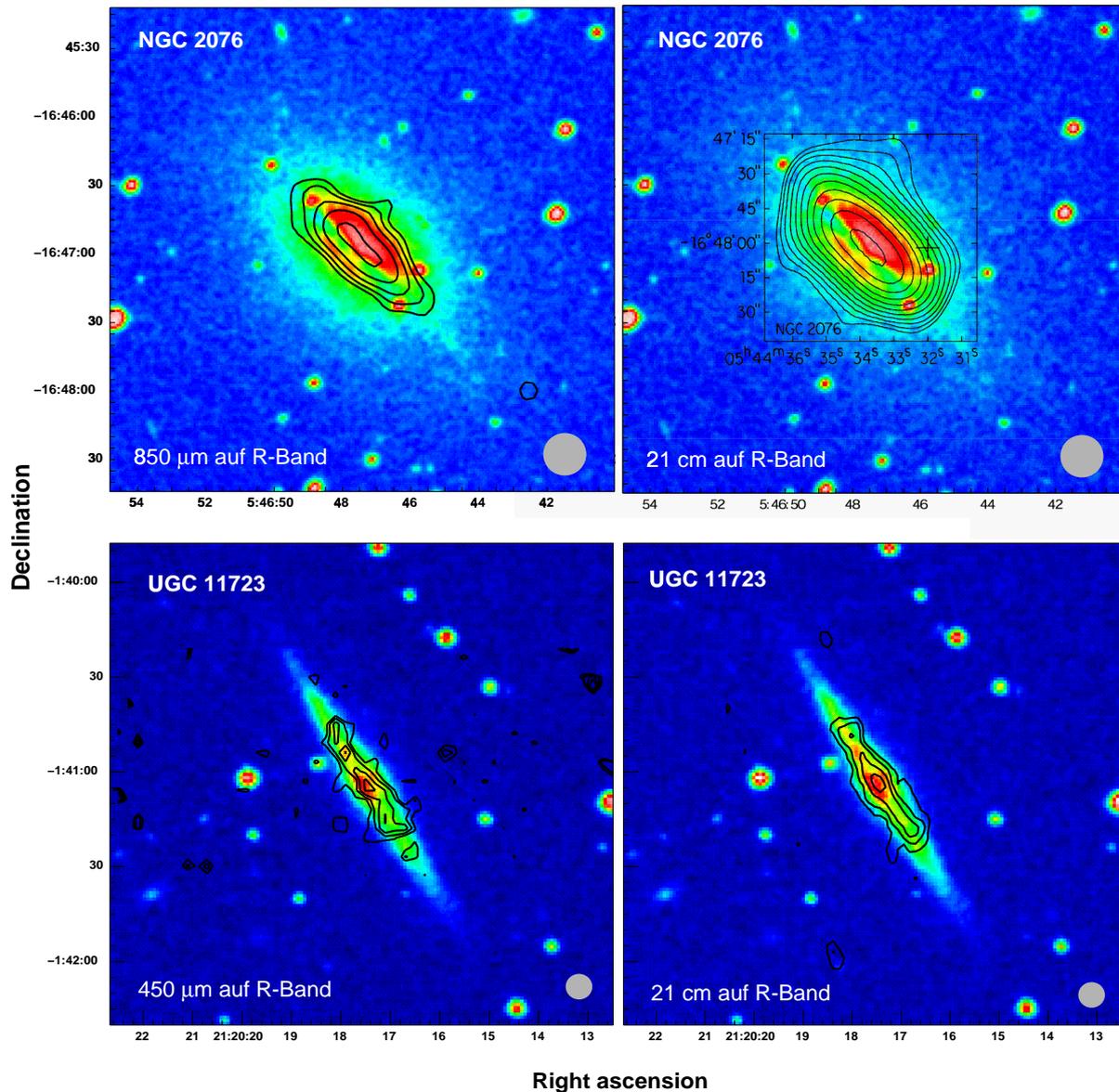


Abbildung 5.1: Linke Spalte: Konturen der thermischen Kontinuumsstrahlung bei 450 μm bzw. 850 μm , überlagert auf R-Band Aufnahmen der Galaxien NGC2076 und UGC 11723. Rechte Spalte: Die selben optischen Aufnahmen, diesmal ist die nicht-thermische Kontinuumsstrahlung bei einer Wellenlänge von 21 cm überlagert. Benachbarte Konturlinien sind in allen Karten um einen Faktor $\sqrt{2}$ erhöht. Um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, wurde beide Karten von NGC 2076 auf eine gemeinsame Auflösung von $20''$, die von UGC 11723 auf $7.5''$ gefaltet. Sie ist als Durchmesser der Hauptkeule durch den grau gefüllten Kreis in der rechten unteren Bildecke angedeutet. Für beide Galaxien entspricht dieser einer linearen Auflösung von 2.4 kpc.

Die mit SCUBA gewonnenen Submillimeter-Karten erlauben neben der präzisen Bestimmung des Gesamtflusses eine detaillierte Analyse der räumlichen Verteilung kalten Staubes in einer Reihe heller ISOSS-Galaxien. Wie die linke Spalte in Abb. 5.1 zeigt, konnte die Staubemission der für das 60 cm ISO-Teleskop punktförmigen Quellen mit Hilfe des 15m-Spiegels am JCMT bei 450 und 850 μm räumlich aufgelöst werden. Dargestellt ist die 850 μm bzw. 450

μm Emission der Galaxien NGC 2076 sowie UGC 11723. In beiden Fällen ist eine ausgedehnte Staubkomponente zu erkennen, die einen großen Teil der optisch sichtbaren Emission überdeckt. Die ausgedehnte Staubemission kann mit einem Signal-zu-Rauschverhältnis größer 3 über wenigstens 50 % des optischen Durchmessers D_{25} verfolgt werden. Solch ausgedehnte Emission ist auch bei Studien der (Sub)millimeter-Emission naher Spiralgalaxien gefunden worden (z.B. Neininger et al. 1996, Bianchi et al. 2000). Die Beobachtungen belegen, daß in beiden Beispielen kalter ISOSS-Quellen nicht ein kompakter nuklearer Starburst, sondern vielmehr eine verteilte Staubkomponente Quelle der Submm- und FIR-Emission ist.

Dabei trifft diese Beobachtung für Galaxien ganz unterschiedlicher Natur zu. Während NGC 2076 eine elliptische Galaxie mit einem prominenten Staubstreifen ist (Möllenhoff et al. 1992), ist UGC 11723 eine späte Spiralgalaxie vom Typ Sb. In beiden Fällen deutet die stark elongierte Emission entlang der optischen Hauptachse der Galaxie darauf hin, daß der kalte Staub in einer scheibenförmigen Geometrie vorliegt. Die hohe Submm-Flächenhelligkeit in diesen beiden Galaxien kann dann als Folge der hohen Inklination gedeutet werden, die zu hohen Säulendichten des Staubes entlang der Sichtlinie durch die Scheibe führt. Bei der Beobachtung von Galaxien mit geringerer Inklination verteilt sich der Gesamtfluß auf eine große Fläche. Dies zeigt die Balkenspirale NGC 5899. Obwohl sie den größten integrierten Submm-Fluß aller beobachteten Galaxien aufweist und darüberhinaus einen aktiven Kern vom Typ Seyfert 2 besitzt, lag die Flächenhelligkeit im Submm an der Nachweisgrenze. Dies deutet auch in diesem Falle auf eine gleichmäßige Verteilung der kalten Staubkomponente über die Scheibe hin. Einzig die leuchtkräftigste der mit SCUBA beobachteten Quellen, die Sbc-Spirale UGC1871, weist ein prominentes kompaktes Emissionsgebiet im Zentrum auf. Dieses macht jedoch nur einen Teil der gesamten Submm-Flusses aus.

In der rechten Spalte von Abb. 5.1 sind Konturkarten der Kontinuumsstrahlung bei 21 cm Wellenlänge dargestellt. Die Daten stammen für NGC 2076 von Condon et al. (1996) und für UGC 11723 aus der FIRST-Durchmusterung (Becker et al. 1995). Obwohl das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Submm-Daten etwas niedriger ist, stimmt die Morphologie der thermischen Staubemission ausgezeichnet mit der 21 cm-Radiokontinuumsstrahlung überein. Dies betrifft sogar schwache Emissionsstrukturen, wie die im Süden von UGC 11723.

Im Gegensatz zu den räumlich aufgelösten Karten mit SCUBA sind die mit der MAMBO-Kamera durchgeführten Messungen schwieriger zu interpretieren. Der von einem Bolometerkanal bei gechoppten Messungen empfangene Fluß entspricht nur für den Fall, daß die Quelle kleiner als die Hauptkeule des Teleskops ist, dem Gesamtfluß. In der Vergangenheit wurden oftmals aus der optischen Morphologie abgeleitete Korrekturfaktoren verwendet (z.B. bei Krügel et al. 1998) die teilweise zu großen, nicht durch die Beobachtungen abgedeckten Korrekturen führten. Unter der Annahme, daß die beobachtete gute Korrelation zwischen kalter Staubemission und nichtthermischer Radio-Kontinuumsstrahlung auch für die MAMBO-Quellen gilt, kann eine Abschätzung der Quellgröße der Staubemission vorgenommen werden. Ein großer Teil der von MAMBO detektierten Quellen ist mit hoher räumlicher Auflösung in der FIRST-Durchmusterung beobachtet worden. Deren synthetisierte Hauptkeule von $6''$ ist kleiner als die der 1.2 mm Messungen und erlaubt die gauss'sche Entfaltung der nicht-thermischen Emissionskomponente. Die ermittelte Quellgröße war in den meisten Fällen kleiner als der Hauptkeulendurchmesser von MAMBO. Dies deutet auf kleine Korrekturfaktoren hin, auf deren Anwendung deshalb ganz verzichtet wurde. In strenger Auslegung kann der in Tab. 5.2 aufgeführte 1.2 mm Fluß somit als untere Grenze angesehen werden.

5.4.2 Spektrale Energieverteilungen

Das Zweifarbandiagramm in Abb. 5.2 zeigt die aus ISOSS 170 μm sowie IRAS 60 und 100 μm Photometrie abgeleiteten Logarithmen der Flußverhältnisse $F_{170\mu\text{m}}/F_{100\mu\text{m}}$ aufgetragen über $\log(F_{100\mu\text{m}}/F_{60\mu\text{m}})$. Die intrinsischen Farben modifizierter Schwarzer Körper im Temperaturbereich 20 - 40 K sind im Diagramm dargestellt. Wie zu sehen ist, können die Farben der Galaxien nicht durch diese Eigenfarben beschrieben werden, selbst wenn der Staubemissivitätsindex β als freier Parameter betrachtet wird. Dies beweist, daß sich die FIR-Emission nicht durch Staub einer einzigen Temperatur beschreiben läßt. Gegenüber der aus IRAS-Daten bestimmten Farbtemperatur weisen alle Galaxien einen Strahlungsexzeß bei 170 μm auf.

Zwischen den beiden Farben ist keine ausgeprägte Korrelation zu festzustellen. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson zwischen $\log(F_{170\mu\text{m}}/F_{100\mu\text{m}})$ und $\log(F_{100\mu\text{m}}/F_{60\mu\text{m}})$ beträgt $r = 0.41$. Dabei ist jedoch zu bedenken, daß die Kalibrationsgenauigkeit von 15% (30 %) für die IRAS (ISOSS)-Daten zu einem relativ großen Fehler bei der Bestimmung der FIR-Farben führt. Eine bestehende Korrelation wäre somit schwer zu erkennen.

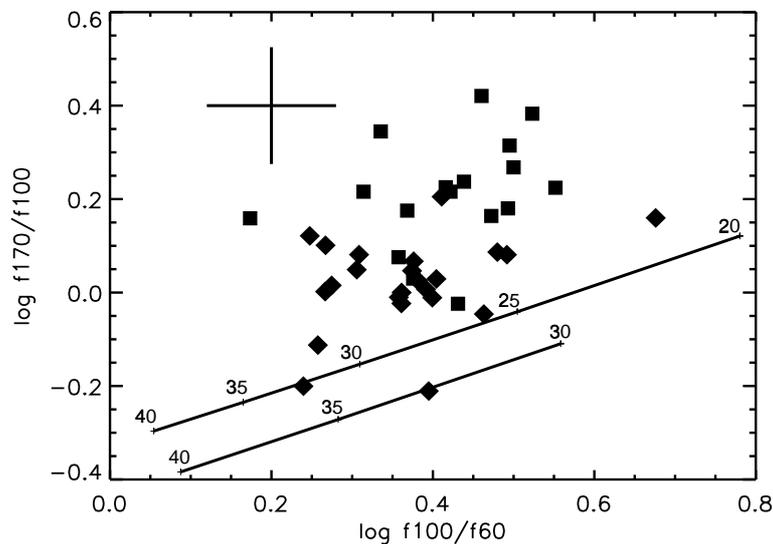


Abbildung 5.2: Zweifarbandiagramm der kalten ISOSS Galaxien. Alle Galaxien mit einer Leuchtkraft $< 10^{11}$ sind durch Quadrate, leuchtkräftigere Quellen mit Rauten markiert. Das Kreuz bezeichnet die durchschnittliche Genauigkeit (1σ) der Farbbestimmung. Die beiden diagonalen Linien entsprechen den Eigenfarben von modifizierten Schwarzen Körpern mit Emissivitätsindizes $\beta = 1$ (oben) sowie $\beta = 2$ (unten).

Um den Strahlungsexzeß bei 170 μm zu charakterisieren, soll die FIR-Emission im folgenden durch zwei optisch dünne Staubkomponenten verschiedener Temperaturen beschrieben werden. Obwohl eine Einteilung in zwei Komponenten technisch motiviert erscheint und alternativ eine kontinuierliche Temperaturverteilung erwartet werden könnte, haben Untersuchungen gezeigt, daß sich selbst in diesem Falle eine kalte und warme Staubkomponente unterscheiden lassen (z.B. Pérez-García et al. 1998). Hinweise auf eine solche bimodale Temperaturverteilung des Staubes fanden auch Chini et al. (1995). Um jedoch die spektralen Energieverteilungen im FIR mit zwei modifizierten Schwarzkörpern zu modellieren, ist außer der IRAS 60 und 100 μm und der ISOSS 170 μm Photometrie mindestens eine zusätzliche Messung zur Bestimmung der vier freien Parameter (Temperaturen und Massen) erforderlich. Hierzu sind die Messungen

mit SCUBA und MAMBO im Rayleigh-Jeans-Bereich besonders geeignet: Die optische Tiefe nimmt ab und die Strahlungsintensität ist in erster Näherung nur linear von der Temperatur abhängig. Abb. 5.3 zeigt exemplarisch die spektrale Energieverteilung der Galaxie NGC 2076 aus Abb. 5.1. Die gefundenen Temperaturen betragen 20 ± 2 K für die kalte und 40 ± 4 K für die warme Komponente. Dabei ist zu berücksichtigen, daß aufgrund der Kontamination des $60 \mu\text{m}$ Flusses durch Emission von kleinen Staubpartikeln die gefundene Temperatur der warmen Komponente nicht einer Gleichgewichtstemperatur entspricht.

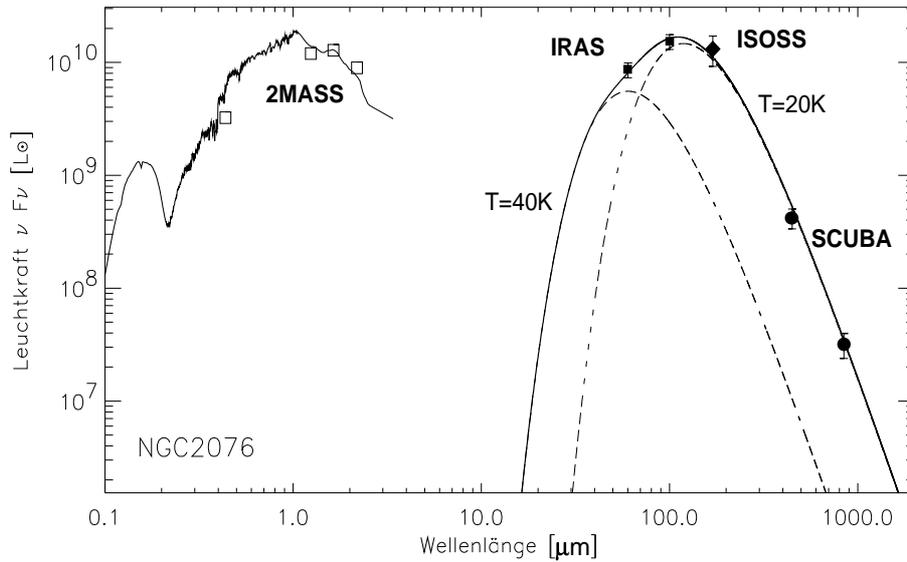


Abbildung 5.3: Spektrale Energieverteilung der Galaxie NGC 2076 aus Abb. 5.1. Die Emission für $\lambda > 40 \mu\text{m}$ kann gut durch die Überlagerung zweier optisch dünner Staubkomponenten (gestrichelt) mit Temperaturen von 20 und 40 K wiedergegeben werden. Das optische Spektrum läßt sich nach Bruzual & Charlot 1995 im wesentlichen durch eine alte stellare Komponente beschreiben.

Unter der Annahme optisch dünner Emission gilt damit für den Modellfluß:

$$F_m \propto C_w \nu^\beta B(\nu, T_w) + C_c \nu^\beta B(\nu, T_c) \quad (m = \text{Modell}) \quad (5.1)$$

Als Emissivitätsindex des Staubes wird $\beta = 2$ gewählt. Dies entspricht dem Wert kalten Staubes in unserer Milchstraße und wurde bei anderen Arbeiten eingesetzt.

Die Bestimmung der Temperaturen und Amplituden der beiden Staubkomponenten erfolgte durch Anpassung des Modells an die Meßwerte mittels der χ^2 -Methode, bei der

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{F_0(\lambda_i) - F_m(\lambda_i)}{\sigma(\lambda_i)} \right]^2 \quad (5.2)$$

minimiert wurde. $\sigma(\lambda_i)$ bezeichnet dabei den jeweiligen Meßfehler.

Am Ende des Kapitels sind in Abb. 5.9 und 5.10 die Energieverteilungen von $0.4\text{-}1000 \mu\text{m}$ aller Objekte der Stichprobe gezeigt. Sie sind im Ruhesystem der Galaxien und nach Anwendung einer photometrischen K-Korrektur erster Ordnung $\propto (1+z)$ gegeben. Die wichtigsten Eigenschaften dieser SEDs sind:

- Alle Galaxien weisen eine ausgeprägte FIR-Emission im Vergleich zum Blauen auf. $L_{\text{IR}}/L_{\text{B}} > 2$, d.h. alle Objekte sind klassische Infrarot-Galaxien.

- Der steile Abfall der Energieverteilung im Submillimeter-Bereich zeigt, daß es sich um thermische Strahlung handelt.
- Der optische Teil der SED weist auf eine dominierende alte stellare Population (in Verbindung mit zusätzlicher Extinktion) hin.

Abb. 5.4 zeigt die Verteilung der abgeleiteten Temperaturen der kalten und warmen Staubkomponente. Die mittleren Temperaturen der beiden Komponenten betragen $\overline{T_c} = 21 \pm 2.5$ K bzw. $\overline{T_w} = 40 \pm 6$ K. Wie in Abb. 5.5d zu erkennen ist, weisen beide Staubtemperaturen eine leichte Abhängigkeit voneinander auf.

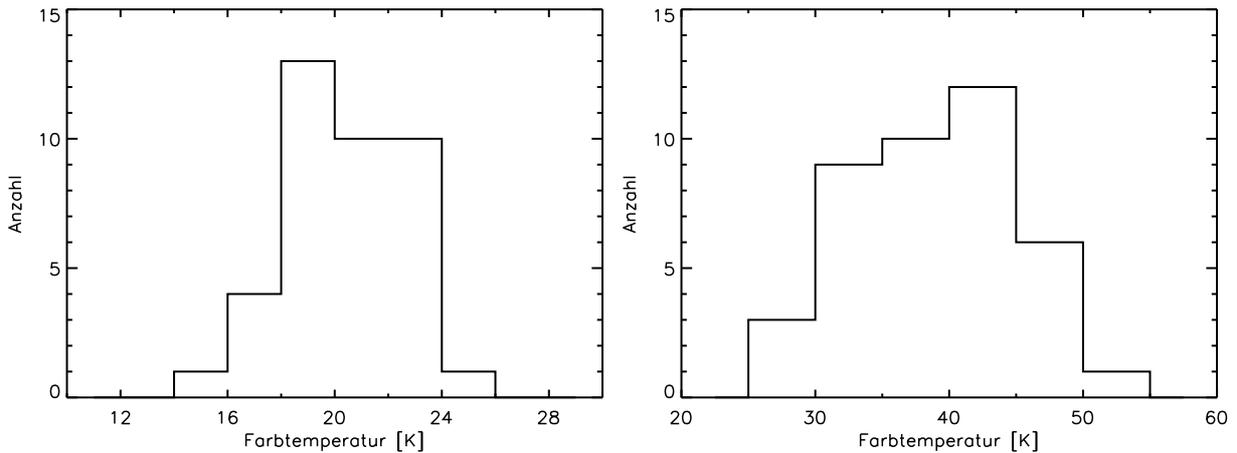


Abbildung 5.4: Verteilung der kalten (links) und warmen (rechts) Staubtemperatur für die ISOSS-Stichprobe.

5.4.3 Leuchtkräfte

Mit der Verfügbarkeit einer zusätzlichen Messung bei $170 \mu\text{m}$ kann die integrale Gleichung von Sanders & Mirabel (1996) zur Bestimmung der IR-Leuchtkraft um einen weiteren Term am Maximum der Strahlungsemission erweitert werden, siehe hierzu die Formel in Stickel et al. (2000)

$$L_{\text{IR}} = 1.810^{-14} 4\pi D_L^2 (13.48F_{12} + 5.16F_{25} + 2.58F_{60} + 1.00F_{100} + 0.63F_{170}) [\text{Wm}^{-2}] \quad (5.3)$$

Aufgrund der spektralen Transmission der Bandpässe von ISO und IRAS gilt diese einfache integrale Formel für einen weiten Bereich von Staubtemperaturen (20-80 K) und Emissivitäten ($0 < \beta < 2$). Der Vergleich mit dem analytisch integrierten Fluß aus den zwei angepassten Staubkomponenten zeigt, daß die FIR-Emission im Bereich 40-1000 μm durch die Formel mit einer Genauigkeit von 10 % reproduziert wird.

Abb. 5.5a zeigt das Histogramm der abgeleiteten IR-Leuchtkräfte. Alle Objekte haben $L_{\text{IR}} > 2 \cdot 10^{10} L_{\odot}$ und sind damit leuchtkräftiger als unsere Milchstraße. 22 Quellen liegen im Bereich $10^{11} L_{\odot} < L_{\text{IR}} < 10^{12} L_{\odot}$ und eine Quelle ist schließlich ultraleuchtkräftig (IRAS15080+7259). Dieses besonders interessante Objekt wird ausführlich in Kapitel 6 besprochen.

Tabelle 5.3: Abgeleitete Parameter der Stichprobe leuchtkräftiger Galaxien mit kaltem Staub. Die Spalten bezeichnen im einzelnen: (1) Name, (2) Entfernung, (3) Absoluthelligkeit in B, (4) Infrarot-Leuchtkraft, (5) Verhältnis von Infrarot- zu Blau-Leuchtkraft, (6-7) kalte und warme Staubtemperatur, (8) Verhältnis der Leuchtkräfte von warmer und kalter Staubkomponente, (9) Gesamte Staubmasse, (10) Verhältnis der warmen zur kalten Staubmasse, (11) Masse des neutralen Wasserstoffs, (12) Gas-zu-Staub-Verhältnis $M(\text{HI}) / M_d$.

Name	D_L [Mpc]	M_B [mag]	L_{IR} [L_{\odot}]	L_{IR}/L_B	T_c [K]	T_w [K]	L_c/L_w	M_d [M_{\odot}]	M_c/M_w	$M(\text{HI})$ [M_{\odot}]	$M(\text{HI}) / M_d$
ESO 473-G006	102	-19.8	4.86E+10	6.5	20.3	49.2	2.0	5.38E+07	397		
UGC 148	57	-19.6	3.31E+10	5.3	20.6	39.1	1.6	2.65E+07	73	5.37E+09	202
UGC 165	81	-19.4	2.95E+10	5.5	18.7	39.7	2.0	5.31E+07	179	6.01E+09	113
ESO 539-G008	98	-19.5	8.48E+10	15.6	22.0	45.4	1.8	4.47E+07	143		
IRAS 01056-1200	310	-20.5	3.68E+11	27.6	22.8	43.8	2.0	2.16E+08	100		
UGC 1871	138	-20.9	3.16E+11	15.7	23.5	40.0	2.2	1.26E+08	52	1.31E+10	104
MCG -3-13-51	90	-20.9	5.10E+10	2.4	19.0	42.7	3.0	8.40E+07	384	9.38E+09	111
NGC 2076	28	-18.9	3.06E+10	9.5	20.3	39.9	2.6	3.36E+07	155	5.98E+09	177
MRK 73	59	-18.9	3.70E+10	10.9	29.4	29.4	1.0	6.08E+05	1		
IRAS 10078+2904	137	-19.4	3.68E+10	7.4	19.0	43.8	0.9	4.71E+07	137		
IRAS 10134+2230	273	-20.9	2.43E+11	12.6	21.4	45.7	1.3	1.78E+08	120		
IRAS 10187+0624	308	-21.3	2.90E+11	10.7	23.5	40.3	1.7	1.31E+08	42		
IRAS 11491+4845	226	-20.0	1.01E+11	11.2	29.2	29.2	1.0	1.86E+07	1		
UGC 7179	35	-18.7	1.74E+10	6.3	24.2	42.2	4.7	7.13E+06	132		
CGCG 315-049	148	-20.6	1.69E+11	11.5	22.9	41.4	2.4	7.90E+07	85		
NGC 4868	62	-21.1	6.97E+10	2.9	20.2	48.3	2.6	8.18E+07	497	3.55E+09	43
IRAS F 13443-0231	450	-19.8	2.37E+11	33.4	17.8	32.6	0.3	2.31E+08	12		
IRAS 13543+5846	164	-19.6	1.23E+11	20.8	22.3	37.3	1.3	6.14E+07	29		
IRAS14276+6103	214	-20.5	2.85E+11	21.3	18.6	33.2	0.2	1.52E+08	7		
NGC 5637	70	-19.4	3.75E+10	7.1	22.3	40.5	2.1	1.91E+07	74	1.64E+09	85
IRAS 15080+7259	966	-20.7	2.27E+12	151.2	18.2	33.1	0.5	2.68E+09	16		
NGC 5899	34	-20.2	2.60E+10	2.5	17.2	38.3	2.7	8.61E+07	339	4.80E+09	55
UGC 10123	49	-18.5	2.14E+10	9.6	16.9	31.0	1.3	5.51E+07	47	1.03E+10	186
IRAS 16052+5334	370	-20.5	4.75E+11	35.1	22.7	43.4	2.9	3.05E+08	143		
IRAS 16319+4725	505	-21.0	5.65E+11	26.7	19.4	36.8	0.5	3.83E+08	24		
UGC 10468	125	-20.2	8.98E+10	8.7	15.9	32.0	1.2	3.51E+08	84		
CGCG 025-001	177	-19.9	2.64E+11	31.9	22.1	42.0	1.5	1.51E+08	67		
CGCG 053-024	206	-21.0	3.25E+11	14.9	23.0	48.1	1.6	1.36E+08	134	9.35E+09	68
CGCG 299-056	106	-19.7	1.12E+11	16.8	19.4	32.0	0.1	2.80E+07	2		
IRAS 17190+6219	340	-20.8	2.07E+11	11.1	20.2	30.4	0.4	1.26E+08	4		
NGC 6478	91	-20.9	8.18E+10	4.0	18.7	37.7	3.0	1.53E+08	199	1.48E+10	96
UGC 11060	62	-19.4	5.50E+10	10.2	19.2	38.8	1.6	7.24E+07	109	3.67E+09	50
IRAS 18047+4621	195	-19.9	1.14E+11	14.7	19.9	34.1	0.9	9.99E+07	22		
IRAS 18119+5504	242	-20.6	2.68E+11	18.5	20.6	37.3	0.7	1.59E+08	25		
IRAS 18167+6539	195	-19.4	1.72E+11	32.8	23.3	40.4	2.2	7.58E+07	58		
NGC 6787	161	-21.3	1.22E+11	4.3	17.7	27.8	1.3	2.54E+08	19		
NGC 6928	63	-21.1	5.58E+10	2.3	18.8	49.3	3.7	1.00E+08	1173	6.67E+09	66
UGC 11723	66	-19.4	5.39E+10	10.9	18.7	50.3	3.0	1.05E+08	1149	6.19E+09	59
IRAS 22225-0645	380	-20.9	4.00E+11	20.5	22.0	43.2	1.4	2.51E+08	77		
NGC 7269	130	-21.3	1.01E+11	3.5	19.4	40.4	2.0	1.29E+08	160		

Die optischen Leuchtkräfte der Galaxienauswahl im B-Band wurden gemäß der Gleichung

$$L_B = 10^{-0.4(M_B - 4.77)} [L_\odot] \quad (5.4)$$

berechnet. Wie in Abb. 5.5c zu sehen ist, zeigt das Histogramm der L_{IR}/L_B -Verhältnisse eine Häufung um den Wert von 10. Dies ist charakteristisch für Galaxien mit einem Sternentstehungsausbruch (Moorwood 1996, Sanders & Mirabel 1996).

Für die Leuchtkraft der nicht-thermischen Radiostrahlung im 21 cm Kontinuum gilt:

$$L_{21\text{cm}} = 1.410^{-17} 4\pi D_L^2 F_{21\text{cm}} [\text{Wm}^{-2}] \quad (5.5)$$

Für die Berechnung der Leuchtkraftentfernung D_L wurden die folgenden kosmologischen Parameter verwendet: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Die abgeleiteten Werte sind in Tab. 5.3 zusammengefasst.

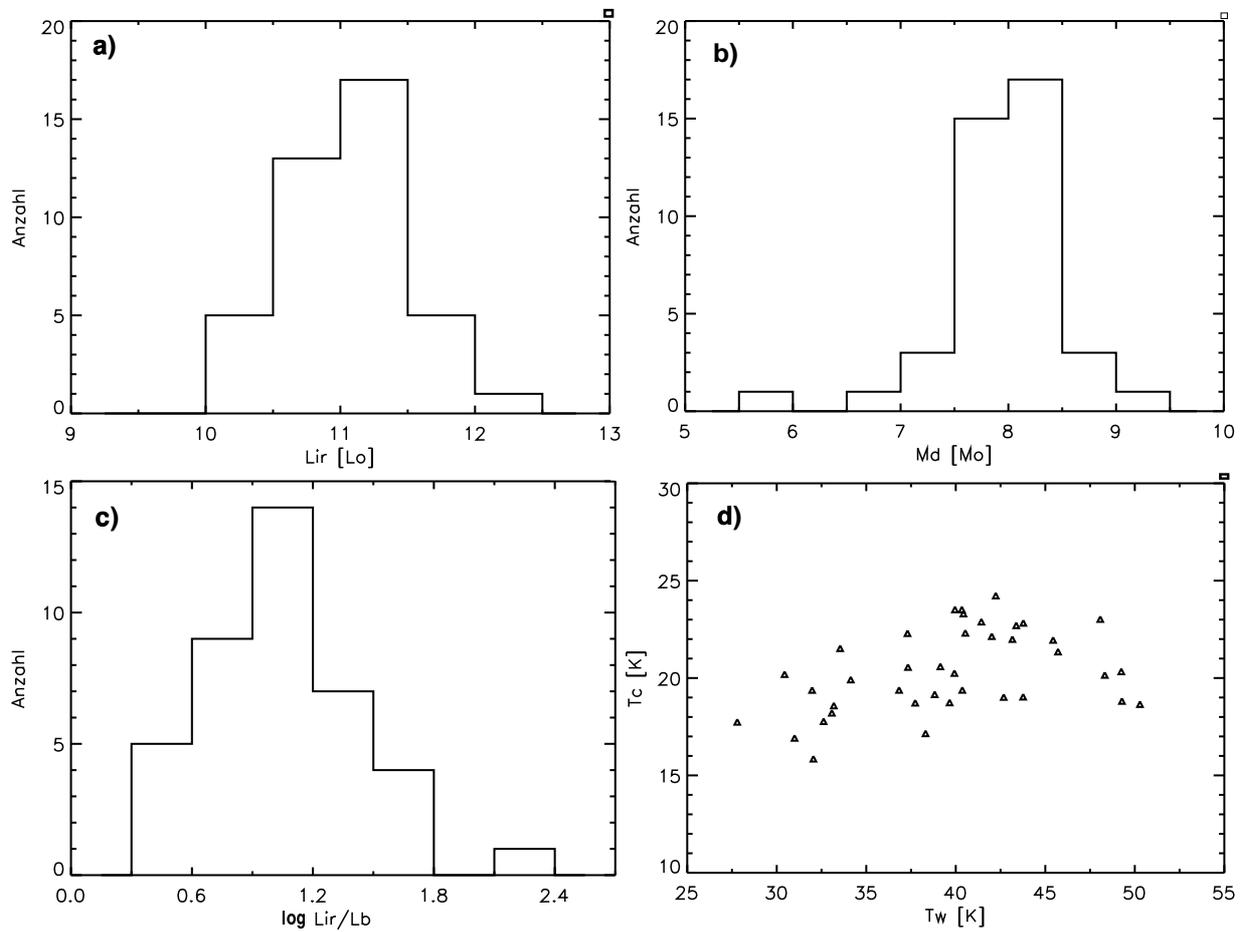


Abbildung 5.5: Eigenschaften der ISOSS-Galaxienauswahl kalter leuchtkräftiger Galaxien: a) Verteilung der Infrarot-Leuchtkräfte $L_{8-1000\mu\text{m}}$, b) Verteilung der Staubmassen, c) Verteilung der Infrarot-zu-Blau-Verhältnisse und d) Korrelation zwischen kalter und warmer Staubtemperatur.

5.4.4 Staub- und Gasmassen

Die Masse des emittierenden Staubes M_d wurde nach Gleichung 3.3 aus der optisch dünnen Emission bei $850\mu\text{m}$ bestimmt. Als Opazität kam nach Lisenfeld et al. (2000) ein Wert von

$\kappa_{850\mu\text{m}} = 0.865 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ zur Verwendung, der für die Messungen bei 1.2 mm gemäß $\kappa_{1200\mu\text{m}} = \kappa_{850\mu\text{m}} \times (850\mu\text{m}/1200\mu\text{m})^2$ transformiert wurde.

Für 15 Galaxien liegen spektroskopische Messungen der 21 cm-Linie neutralen Wasserstoffs vor. Diese HI-Flüsse wurden gemäß

$$M(\text{HI}) = 2.36 \cdot 10^5 D_L^2 S_{\text{HI}} \quad [\text{M}_\odot] \quad (5.6)$$

in Gasmassen umgerechnet, wobei D_L wiederum in Mpc und S_{HI} in Jy km/s gegeben sind.

Die daraus bestimmten Massenverhältnisse von (atomarem) Gas zu Staub zeigen nur eine kleine Streuung. Der Mittelwert beträgt 101 ± 52 , in guter Übereinstimmung mit einem Wert von 120 ± 35 für das Sample von Dunne & Eales (2001) sowie 142 ± 25 für unsere Milchstraße (Sodroski et al. 1997).

5.4.5 Optische Eigenschaften

Für rund 2/3 der Quellen ist eine morphologische Klassifikation verfügbar (Tab. 5.2). Beim überwiegenden Teil dieser Galaxien handelt es sich um Spiralgalaxien, jedoch sind auch frühe Galaxientypen vom Typ S0/E in der Auswahl vorhanden. In Anbetracht der hohen Infrarotleuchtkraft sind wechselwirkende Systeme unterrepräsentiert (siehe zum Vergleich Sanders & Mirabel 1996). An dieser Stelle sei jedoch darauf hingewiesen, daß sich auf tiefen Direktaufnahmen mit einem ausreichend großen Teleskop auch in auf den ersten Blick ungestörten Systemen Anzeichen von Wechselwirkung finden lassen können. Abb. 5.6 zeigt ein B-K über J-K Zweifarbanddiagramm der Galaxien-Stichprobe. Wie der Vergleich mit den angegebenen Eigenfarben normaler Spiralgalaxien und elliptischer Galaxien ergibt, weisen die ISOSS-Quellen einen NIR-Exzess auf. Die beobachteten Werte lassen nach Gordon & Calzetti (1997) Starburst-Aktivität vermuten.

5.5 Diskussion

5.5.1 Über die Existenz sehr kalten Staubes

Eines der wissenschaftlichen Ziele der Submillimeter-Beobachtungen kalter ISOSS-Galaxien war die Suche nach einer sehr kalten Staubkomponente. Die Existenz von Staub im Temperaturbereich 10 - 12 K in Galaxien wird seit langem diskutiert (z.B. Eales et al. 1989, Reach et al. 1995, Siebenmorgen et al. 1999 und Dunne et al. 2000). Eine solche Staubkomponente würde stark im Submillimeter-Bereich strahlen und könnte einen starken Einfluß auf statistische Größen wie die Leuchtkraft-Funktion von Galaxien haben. Erst ISO war mit einer Grenzwellenlänge von $240 \mu\text{m}$ geeignet für den Nachweis auch sehr kalten Staubes. Dies konnte z.B. in den Kapiteln 3 und 4 bei der Suche nach besonders kalten galaktischen Quellen gezeigt werden.

Ein Ziel der Beobachtungskampagne mit SCUBA war es, zweifelsfrei festzustellen, ob sehr kalter Staub in Galaxien mit einem hohen Flußverhältnis $F_{170\mu\text{m}}/F_{100\mu\text{m}}$ existiert. Um die spektrale Energieverteilung einer solchen Staubkomponente zuverlässig zu bestimmen, ist die präzise Vermessung des Rayleigh-Jeans-Bereiches erforderlich. Die Möglichkeit simultaner Messungen bei 450 und $850 \mu\text{m}$ machen SCUBA gut für diese Aufgabe geeignet. Mit Hilfe der oben

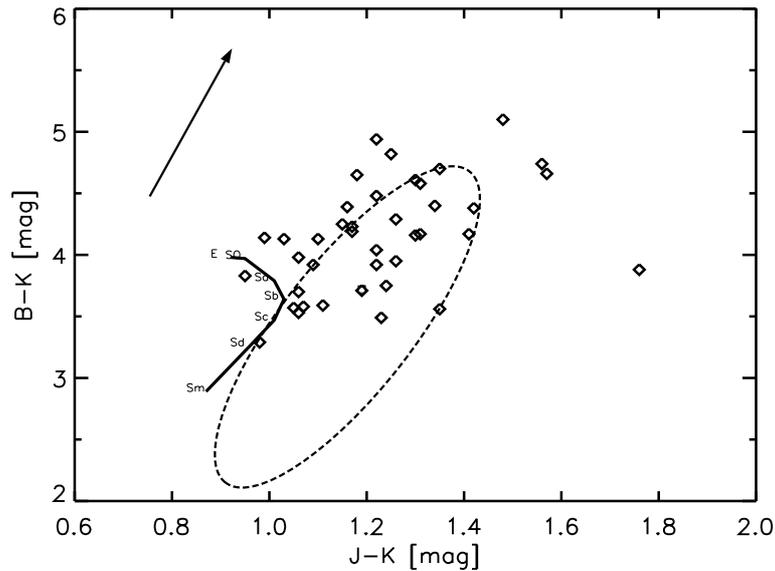


Abbildung 5.6: Zweifarbendiagramm von B-K über J-K der Galaxienauswahl. Die Eigenfarben normaler Spiralgalaxien und elliptischer Galaxien (nach Fioc et al. 1999, durchgezogene Linie) sowie von Starburstgalaxien (nach Gordon & Calzetti 1997, gestrichelte Ellipse) sind angegeben. Ebenfalls gezeigt ist der Extinktionsvektor für $A_V = 1$ nach Rieke & Lebofsky (1985).

beschriebenen Anpassung einer warmen und kalten Staubkomponente wäre die Anwesenheit sehr kalten Staubes an einem $850 \mu\text{m}$ -Strahlungsexzeß über der aus 170 und $450 \mu\text{m}$ bestimmten Staubtemperatur erkennbar.

Obwohl die SCUBA-Beobachtungen unter sehr guten atmosphärischen Bedingungen stattgefunden haben und neben der $170 \mu\text{m}$ ISOSS-Messung Daten bei 450 und $850 \mu\text{m}$ vorliegen, gibt es bei keiner der untersuchten Galaxien Anzeichen auf eine sehr kalte ($T \sim 10 \text{ K}$) Staubkomponente. Dies ist unmittelbar aus Abb. 5.9 ersichtlich. Bei allen Quellen liegt die Photometrie bei 450 und $850 \mu\text{m}$ im Rahmen der Meßfehler der kalten ($T \sim 20 \text{ K}$) Komponente.

5.5.2 Ferninfrarot-zu-Radio Korrelation

Die Analyse der spektralen Energieverteilungen im letzten Abschnitt zeigte, daß die Staubemission der untersuchten leuchtkräftigen ISOSS-Galaxien gut durch zwei Staubkomponenten mit typischen Temperaturen von $\sim 20 \text{ K}$ bzw. 40 K beschrieben werden kann. Das Auftreten von Staub dieser Temperaturbereiche bei normalen Spiralgalaxien kann im Rahmen des Zwei-Komponenten-Modells der IR-Emission (Helou 1986) gedeutet werden: Während die warme Komponente Staub in der unmittelbaren Umgebung von Sternentstehungsgebieten darstellt, liegt der kalte Staub vor allem in Regionen niedriger Dichte und niedriger Strahlungsintensität vor, die von der alten stellaren Population geheizt werden. Wie Mezger et al. (1982) gezeigt haben, besitzt dieser im allgemeinem interstellaren Strahlungsfeld erwärmte Staub eine Gleichgewichtstemperatur von $T \sim 20 \text{ K}$. Der relative Anteil der beiden Komponenten wird üblicherweise als Indikator für den Entwicklungszustand einer Galaxie gesehen. Während große Mengen von kaltem Staub auf eine Ruhephase hindeuten, sind schubweise Phasen aktiver Sternentstehung von einer Zunahme warmer Staubemission gekennzeichnet.

Obwohl die Verbindung von Zirkon-Emission zu interstellarem Strahlungsfeld ausschließlich

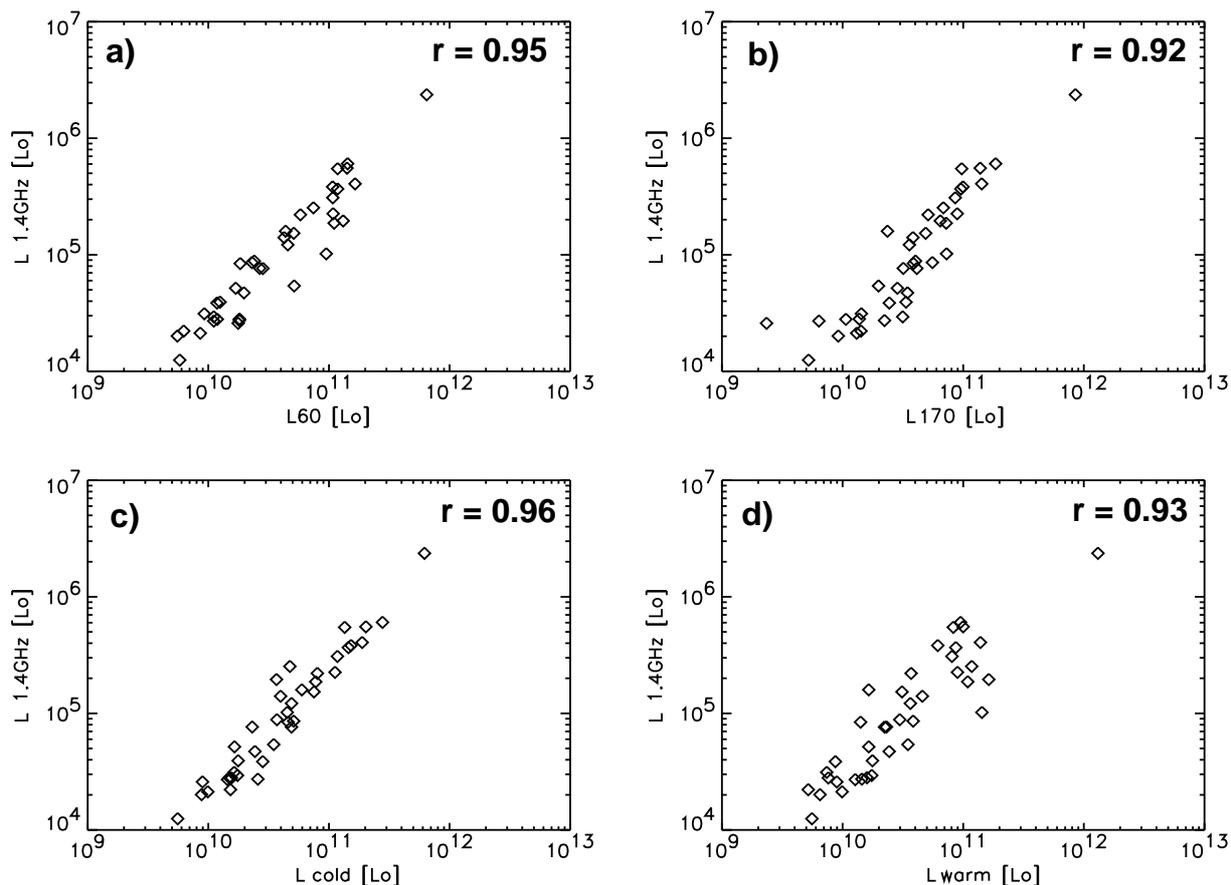


Abbildung 5.7: Korrelation zwischen der Radiokontinuumsleuchtkraft bei 21 cm sowie unterschiedlichen Infrarotleuchtkräften. a) $L_{21\text{cm}}-L_{60\mu\text{m}}$, b) $L_{21\text{cm}}-L_{170\mu\text{m}}$, c) $L_{21\text{cm}}-L_{\text{kalt}}$ und d) $L_{21\text{cm}}-L_{\text{warm}}$.

in unserer Milchstraße und einigen nahen Galaxien räumlich aufgelöst studiert werden kann (z.B. Hippelein et al. 2003), wird aufgrund seiner Temperatur oftmals auch kalter Staub in leuchtkräftigen Galaxien mit einer Zirkuskomponente assoziiert (siehe z.B. Efstathiou & Rowan-Robinson 2003). Im Falle der leuchtkräftigen *und* kalten ISOSS-Galaxien deutet die hohe IR-Leuchtkraft und der NIR-Exzeß auf aktive Sternentstehung, die große Menge kalten Staubes jedoch auf eine Phase momentaner Ruhe hin. Dieser Widerspruch führt auf folgende wichtige Frage: Wird die leuchtkräftige kalte Staubkomponente in den ISOSS-Galaxien wie in unserer Milchstraße vom allgemeinen Strahlungsfeld einer ausgedehnten (alten) Komponente oder vom (lokalen) Strahlungsfeld junger Sterne in Sternentstehungsgebieten geheizt?

Die gute morphologische Übereinstimmung (Abb. 5.1) der kältesten Staubkomponente in den ISOSS-Galaxien mit nicht-thermischer Strahlung im 21cm-Radiokontinuum deutet auf eine Verbindung zwischen kaltem Staub und massereicher Sternentstehung hin. Eine Korrelation zwischen nicht-thermischer Radiostrahlung und Staubemission bei $850\mu\text{m}$ haben kürzlich ebenfalls Brar et al. (2003) bei der Galaxie NGC 5775 gefunden. Die Radio-Kontinuumsstrahlung ist ein guter Indikator gegenwärtiger Sternentstehungsaktivität in Galaxien. Nahezu die gesamte Radiostrahlung im cm-Bereich stellt Synchrotronstrahlung relativistischer Elektronen sowie Frei-Frei-Strahlung von H II-Regionen dar. Ausschließlich massereiche Sterne führen zu Supernovae vom Typ II oder Ib, deren Überreste die wichtigsten Orte zur Beschleunigung relativistischer Elektronen sind. Massereiche Sterne sind dazu die Ionisationsquelle von H III-Regionen.

In Folge dieser Prozesse existiert eine enge Korrelation zwischen Radio- und FIR-Leuchtkraft in Galaxien mit aktiver Sternentstehung (Condon 1992).

Von der morphologischen Übereinstimmung zwischen kaltem Staub und Radio geleitet, wurde in Abb. 5.7c die Leuchtkraft im 21 cm-Radiokontinuum $L_{21\text{cm}}$ mit der Leuchtkraft der kalten Staubkomponente L_{kalt} korreliert. Es zeigt sich eine starke Korrelation (Korrelationskoeffizient nach Pearson $r = 0.96$), die größer als die zwischen $L_{21\text{cm}}$ und der Leuchtkraft der warmen Staubkomponente L_{warm} ist (Abb. 5.7d, $r = 0.93$). Gezeigt sind dazu die klassische FIR-zu-Radio-Korrelation zwischen der Leuchtkraft im IRAS 60 μm -Band $L_{60\mu\text{m}}$ und $L_{21\text{cm}}$, ($r = 0.95$) sowie $L_{170\mu\text{m}}$ und $L_{21\text{cm}}$ ($r = 0.92$). Der Vergleich zeigt, daß die Leuchtkraft der nicht-thermischen Radiostrahlung am besten mit der Leuchtkraft der kalten Staubkomponente korreliert ist. Dies deutet darauf hin, daß in den leuchtkräftigen ISOSS-Galaxien junge masse-reiche Sterne signifikant zur Heizung der kalten Staubkomponente beitragen und kalter Staub im Gegensatz zur Milchstraße nicht vornehmlich durch das allgemeine interstellare Strahlungsfeld einer alten stellaren Population geheizt wird. Der Befund ist überraschend, da nach dem klassischen Zwei-Komponenten-Modell warmer Staub mit Sternentstehungsgebieten assoziiert ist und demnach eine Korrelation besonders zwischen $L_{21\text{cm}}$ und L_{warm} zu erwarten wäre. Wenn die kalte Zirkus-Komponente von Galaxien primär von einer älteren, radioleisen stellaren Population geheizt würde, sollte eine Subtraktion dieser Komponente die FIR-zu-Radio-Korrelation weiter erhöhen. Eine derartige Korrektur ist von Fitt et al. (1988) durchgeführt wurden, jedoch konnte die Korrelation dadurch nicht verbessert werden. Eine Korrelation zwischen kaltem Staub und Radiostrahlung ist dagegen von Xu et al. (1994) gefunden wurden. Die kalte Staubkomponente wurde in dieser Studie jedoch indirekt aus IRAS 100 μm -Photometrie mit Hilfe von $H\alpha$ -Messungen bestimmt. Die bis in den mm-Bereich ermittelten spektralen Energieverteilungen der vorliegenden ISOSS-Galaxienauswahl erlauben zum ersten Mal, zuverlässig kalte und warme Staubkomponenten mit der Radiostrahlung zu korrelieren.

Die in Kapitel 3 durchgeführten Beobachtungen belegen, daß in leuchtkräftigen galaktischen massereichen Sternentstehungsregionen große Mengen von mit IRAS nicht nachgewiesenem kaltem Staub ($T \sim 18$ K) vorhanden sind. Die thermische Strahlung solcher Sternentstehungsgebiete könnte einen Teil der kalten Staubemission in Galaxien mit aktiver Sternentstehung beitragen. Auch die von Haas et al. (2002) gefundene Korrelation von PAH-Emission und kaltem Staub scheint darauf hindeuten, daß die zur PAH-Anregung benötigte kurzwellige Strahlung einer jungen stellaren Population mit kaltem Staub assoziiert ist. Strahlungstransportrechnungen für NGC 891 (eines der Objekte der Studie von Haas et al. 2002) von Popescu et al. (1990) zeigen, daß 60 % der Emission in Submm-Regime ihren Ursprung in UV-Photonen einer jungen stellaren Population haben.

Die hinreichende Verfügbarkeit gemessener Rotverschiebungen hat es möglich gemacht, die FIR-zu-Radio-Korrelation einer großen Zahl von IRAS-Quellen zu untersuchen. Yun et al. (2001) benutzten dafür 1809 Quellen einer flußlimitierten IRAS-Stichprobe ($F_{60\mu\text{m}} > 2$ Jy). Diese Stichprobe wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit benutzt, um die Korrelation von kaltem Staub und Radiostrahlung einer größeren Zahl von Galaxien zu untersuchen. Da für die überwiegende Zahl der Quellen keine 170 μm und Submillimeter-Daten zur Verfügung stehen, wurden ausschließlich die Leuchtkräfte bei 60 μm und 100 μm betrachtet. Die Korrelation dieser Leuchtkräfte mit der Radiostrahlung zeigt, daß die Radioleuchtkraft $L_{21\text{cm}}$ besser mit $L_{100\mu\text{m}}$ als mit $L_{60\mu\text{m}}$ korreliert ist. Die abgeleiteten Korrelationskoeffizienten nach Pearson betragen 0.93 bzw. 0.90. Außerdem hängt das Verhältnis von $L_{21\text{cm}}/L_{60\mu\text{m}}$ vom Flußverhältnis $F_{60\mu\text{m}}/F_{100\mu\text{m}}$ ab. Demnach besitzen Objekte mit wärmerem Staub ein Defizit an Radiostrah-

lung. Dies ist plausibel, wenn nicht vornehmlich die warme, sondern die kalte Staubemission mit der Radiostrahlung korreliert ist. Tatsächlich ergibt die Untersuchung der Abhängigkeit von $L_{21\text{cm}}/L_{100\mu\text{m}}$ als Funktion von $L_{60\mu\text{m}}/L_{100\mu\text{m}}$ einen universellen Wert. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, daß die kalte Staubkomponente in Galaxien mit der nicht-thermischen Radioemission in enger Verbindung steht.

5.5.3 Implikationen für die Identifikation von Submillimeter-Galaxien

Die Verfügbarkeit großflächiger Bolometer-Kameras wie SCUBA und MAMBO haben es routinemäßig möglich gemacht, tiefe Durchmusterungen im Submm-Bereich durchzuführen. Im Rahmen dieser Durchmusterungen konnten mittlerweile einige hundert Submm-Quellen entdeckt werden (Blain et al. 2002), die im Optischen teilweise sehr lichtschwach sind. Die genaue Identifikation gestaltet sich oftmals schwierig. Ein Grund dafür ist die verhältnismäßig geringe Positionsgenauigkeit von einigen Bogensekunden aufgrund typischer Winkelauflösungen von z.B. $14.5''$ bei SCUBA. Als favorisierte Deutung dieser Quellen wird oftmals von hochrotverschobenen Galaxien mit Eigenschaften ähnlich der lokalen Population von ULIRGS ausgegangen, die wie ihr Prototyp Arp 220 durch warme Staubemission gekennzeichnet sind. Aufgrund der negativen K-Korrektur sind solche Quellen im Submillimeter-Bereich auch bei großen Entfernungen verhältnismäßig einfach zu beobachten. Die bisherigen Annahmen zur Leuchtkraftfunktion im Submillimeter basieren jedoch überwiegend auf Stichproben auf der Grundlage von IRAS (z.B. Dunne et al. 2000). Mit dem IRAS-Satelliten durchgeführte Messungen der kurzwelligen Seite des thermischen Strahlungsmaximums begünstigten den Nachweis von Objekten mit warmem Staub.

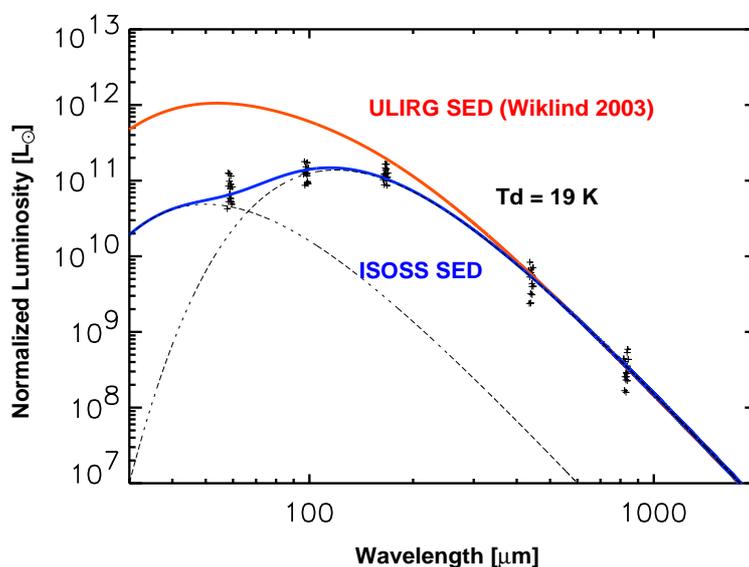


Abbildung 5.8: Gemittelte spektrale Energieverteilung der ISOSS-Galaxien (blau) im Vergleich zu lokalen ULIRGs (rot) aus Wiklind (2003). Obwohl die ISOSS Galaxien um eine Größenordnung schwächer in der bolometrischen Leuchtkraft sind, ist deren Helligkeit im Submillimeter-Bereich aufgrund der kalten Staubkomponente vergleichbar.

Quellen mit deutlich kälteren Staub stellen trotz geringerer Leuchtkraft jedoch helle Objekte in solchen Submm-Durchmusterungen dar. Um den möglichen Einfluß der kalten leuchtkräftigen ISOSS-Galaxien auf die Identifikation von Submillimeter-Galaxien zu untersuchen, wurde

in Abb. 5.8 die spektrale Energieverteilung der Galaxienauswahl mit der von lokalen (warmen) ultraleuchtkräftigen Galaxien verglichen. Die rote Kurve zeigt die gemittelte spektrale Energieverteilung einer Stichprobe von 40 ultraleuchtkräftigen Galaxien, die von Klaas et al. (2001) mit dem ISO-Satelliten und im Submillimeterbereich beobachtet wurden. Im Verfahren nach Wiklind (2003) wurden die einzelnen Energieverteilungen so normiert, daß die interne Streuung für Wellenlängen größer $60 \mu\text{m}$ minimiert wurde. Die blaue Kurve zeigt eine Anpassung zweier Staubkomponenten an alle ISOSS-Galaxien, für die SCUBA-Daten vorliegen, analog zur Methode von Wiklind. Wie zu sehen ist, sind die ISOSS-Quellen für einen gegebenen Submm-Fluß $F_{850\mu\text{m}}$ in ihrer Absolutleuchtkraft $10 \times$ leuchtschwächer als ULIRGS. Da die Raumdichte von leuchtkräftigen Galaxien des Leuchtkraftbereichs $L_{\text{IR}} \sim 10^{10} - 10^{12} L_{\odot}$ stark mit steigender Leuchtkraft abnimmt (Sanders & Mirabel 1996), ist zu erwarten, daß im Rahmen des Malmquist-Bias auf dem Rayleigh-Jeans-Ast vor allem kalte Galaxien detektiert werden (Eales 1999).

Die Existenz kalter leuchtkräftiger Galaxien in der ISOPHOT $170 \mu\text{m}$ Zufallsdurchmusterung und deren Eigenschaften zeigen, daß solche Objekte tatsächlich einen signifikanten Anteil in tiefen Submillimeter-Durchmusterungen ausmachen können. Dies bestätigen zwei Quellen bei $z \sim 0.75$ aus der $170 \mu\text{m}$ FIRBACK-Durchmusterung mit ISOPHOT (Dole et al 2000), die mit SCUBA beobachtet wurden und ebenfalls deutlich kälteren Staub für ihre Leuchtkraft zeigen, als warme ULIRGs des lokalen Universums (Chapman et al. 2002).

5.6 Zusammenfassung

Es wurden (Sub)millimeter-Beobachtungen einer Zufallsstichprobe von 40 kalten und gleichzeitig leuchtkräftigen IR-Galaxien aus der Zufallsdurchmusterung durchgeführt. Die Beobachtungen erlauben die Konstruktion detaillierter spektraler Energieverteilungen zwischen 0.4 und $1200 \mu\text{m}$ Wellenlänge. Die Untersuchung dieser SEDs führte zu folgenden Ergebnissen:

1. Die spektrale Energieverteilung im Bereich $40\text{-}1200 \mu\text{m}$ kann gut durch optisch dünne Schwarzkörperstrahlung einer kälteren und einer wärmeren Staubkomponente mit Temperaturen von 21 ± 2.5 bzw. 40 ± 6 K beschrieben werden.
2. Die kalte Staubkomponente trägt zu einem Großteil der Leuchtkraft bei und besitzt eine Masse von $M_{\text{d}} \sim 10^{8 \pm 1} M_{\odot}$.
3. Die abgeleiteten Massen von Gas und Staub stehen in einem Massenverhältnis von 101 ± 52 und ähneln damit dem Wert unserer Milchstraße.
4. Für zwei helle Galaxien konnten räumlich aufgelöste Submillimeter-Karten erhalten werden. Sie zeigen, daß die kalte Staubemission über einen Großteil der optischen Ausdehnung der Galaxien verteilt ist. Die Morphologie im Submillimeter-Bereich stimmt sehr gut mit der im 21 cm Kontinuum überein. Dies weist auf eine Verbindung zwischen kalter Staubemission und nicht-thermischer Radiostrahlung hin.
5. Es wurde eine Korrelation zwischen der Leuchtkraft der kalten Staubkomponente und der nicht-thermischen Radioleuchtkraft bei 21 cm gefunden. Da letztere durch die Zahl der Supernovaexplosionen bestimmt ist, liegt der Schluß nahe, daß die kalte Staubstrahlung überwiegend aus Sternentstehungsgebieten kommt.

6. Die leuchtkräftige kalte Staubkomponente macht die Quellen der untersuchten Galaxienauswahl zu hellen Quellen im Submillimeter-Bereich. Verglichen mit ULIRGs besitzen die ISOSS-Quellen für einen gegebenen Submm-Fluß $F_{850\mu\text{m}}$ eine $10 \times$ geringere Absolutleuchtkraft und sind damit in ihrer Anzahl häufiger. Solche kalten und leuchtkräftigen Galaxien müssen daher bei der Identifikation von Quellen in blinden Submillimeter-Durchmusterungen berücksichtigt werden.
7. Obwohl die spektralen Energieverteilungen im FIR- und Submillimeter-Bereich mit 170, 450 und $850 \mu\text{m}$ besonders gut überdeckt sind, konnte in keinem Objekt eine lange diskutierte, sehr kalte Staubkomponente mit $T \sim 10\text{-}12 \text{ K}$ nachgewiesen werden.

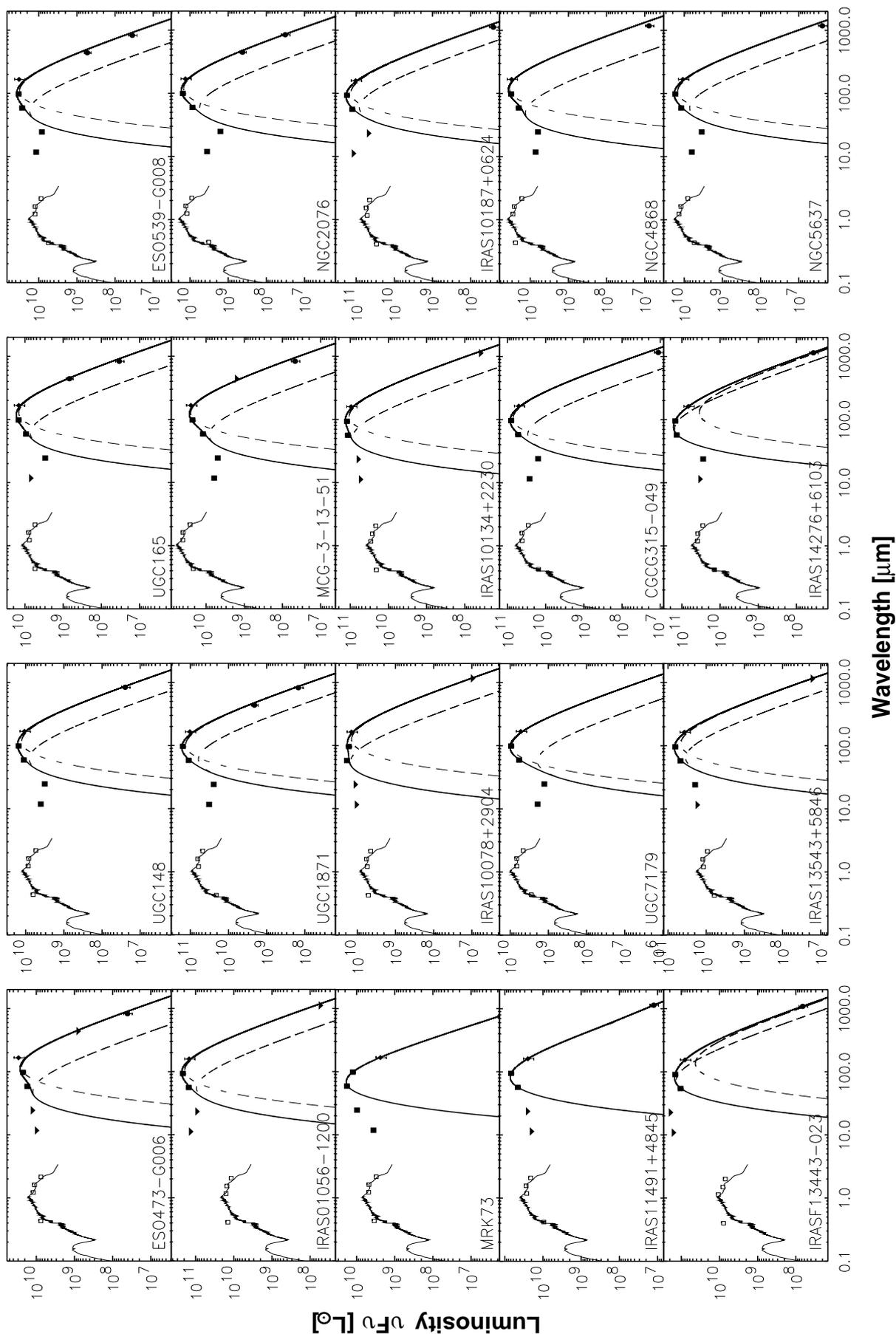


Abbildung 5.9: Spektrale Energieverteilungen der ISOSS-Galaxienauswahl. Offene Quadrate bezeichnen Messwerte aus 2MASS/LEDA, gefüllte Quadrate IRAS, Rauten ISOPHOT, Punkte SCUBA/MAMBO und Dreiecke obere Flußgrenzen (3σ). Zur weiteren Erläuterung siehe auch Abb. 5.3.

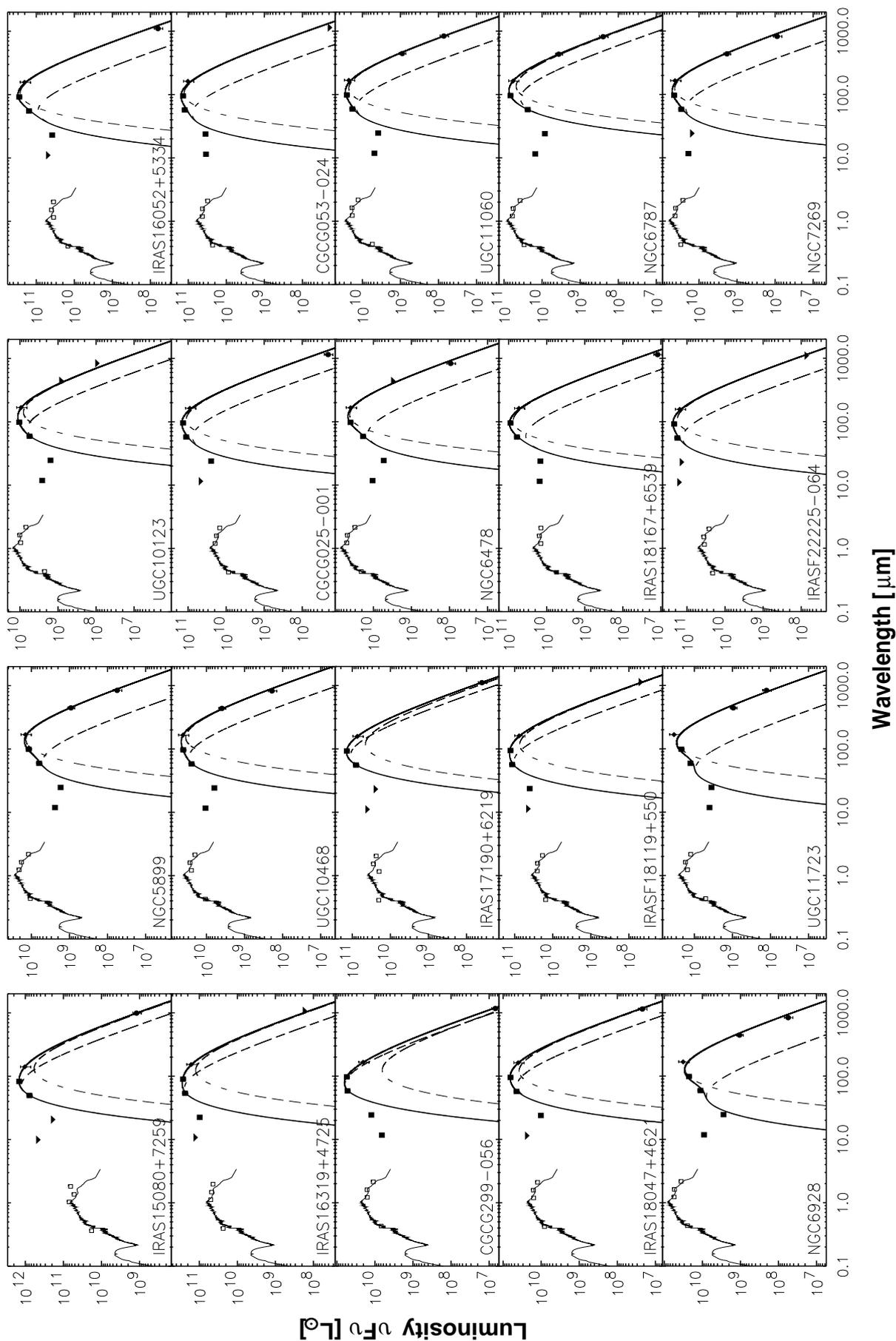


Abbildung 5.10: Fortsetzung.

Kapitel 6

Fallstudie II: Die gas- und staubreiche elliptische Galaxie ISOSS 15079+7247

Es wurde eine Studie der ungewöhnlichen Galaxie ISOSS J 15079+7247 aus der im vorigen Kapitel beschriebenen Stichprobe durchgeführt. Mit einer bolometrischen Helligkeit von $L_{\text{FIR}} \sim 2 \times 10^{12} L_{\odot}$ ist dieses Objekt eine der leuchtkräftigsten Galaxien, die in der $170 \mu\text{m}$ ISOPHOT Zufallsdurchmusterung nachgewiesen werden konnten. Beobachtungen von 1.2 mm Kontinuums- und CO (1–0) Linienemission, optische Spektren und tiefe R-Band Direktaufnahmen des Objektes konnten erhalten werden. Die CO-Emission stammt von einer elliptischen Riesengalaxie bei der Rotverschiebung $z = 0.2136$, für die eine molekulare Gasmasse von $2.9 \times 10^{10} M_{\odot}$ abgeleitet wurde. Die hohe Gasmasse unterstützt das Bild, daß auch die Staubemission mit dieser elliptischen Galaxie assoziiert ist. Die Natur der ultraleuchtkräftigen Infrarotemission kann im Rahmen eines optisch dicken, verborgenen Sternentstehungsausbruches im Zentrum der elliptischen Galaxie erklärt werden. Die riesige Staubmasse von $5 \times 10^8 M_{\odot}$ entspricht einer sichtbaren Extinktion von $A_V \sim 1000 \text{ mag}$. Das ist konsistent mit der Abwesenheit jeglicher optischer Hinweise (Linienstrahlung, blaues Kontinuum) auf starke Sternentstehung in ISOSS J 15079+7247 und der Stärke nicht-thermischer Strahlung im cm-Kontinuum.

6.1 Einleitung

Im Rahmen der ISOPHOT Zufallsdurchmusterung konnten ungefähr 2000 Galaxien bei $170 \mu\text{m}$ nachgewiesen werden; dies stellt eine einzigartige Datenbasis für spektrale Energieverteilungen im fernen Infrarot jenseits der IRAS $100 \mu\text{m}$ Grenze dar. Erste statistische Untersuchungen durch Stickel et al. (2000) zeigten, daß *späte* Galaxientypen allgemein eine kalte ($T \sim 20 \text{ K}$) Staubkomponente aufweisen. Hinsichtlich *früher* Galaxientypen ist jedoch die geläufige Meinung, daß diese staubärmer und leuchtschwächer im Infraroten sind (siehe Knapp 1999 für einen aktuellen Überblick). Im folgenden soll eine Studie der elliptischen Galaxie ISOSS J 15079+7247 beschrieben werden, die überraschenderweise als ultraleuchtkräftige Infrarotquelle in der ISOPHOT-Zufallsdurchmusterung gefunden werden konnte.

6.2 Beobachtungen

ISOSS J 15079+7247 ist eine unaufgelöste Punktquelle mit einer Flußdichte von $F_{170\ \mu\text{m}} = 2.0\ \text{Jy}$ (Tab. 6.1), detektiert in einer Gegend niedriger galaktischer Zirkonkontamination ($I_{100\ \mu\text{m}} < 0.5\ \text{MJy sr}^{-1}$, Schlegel et al. 1998). Die Quelle wurde zentral von einem Schwenk überfahren und in allen vier Detektorpixeln nachgewiesen. Innerhalb der Positionsfehler der Zufallsdurchmusterung ($\sim 20''$ rms, Stickel et al. 2000), stimmt das Objekt in der Position mit der IRAS Punktquelle F15080+7259, einer 2MASS Nahinfrarot-Quelle und einer kompakten 1.2 mm Kontinuums-Quelle überein, die im Rahmen der Nachfolgebeobachtungen mit MAMBO am IRAM 30m-Teleskop gefunden werden konnte.

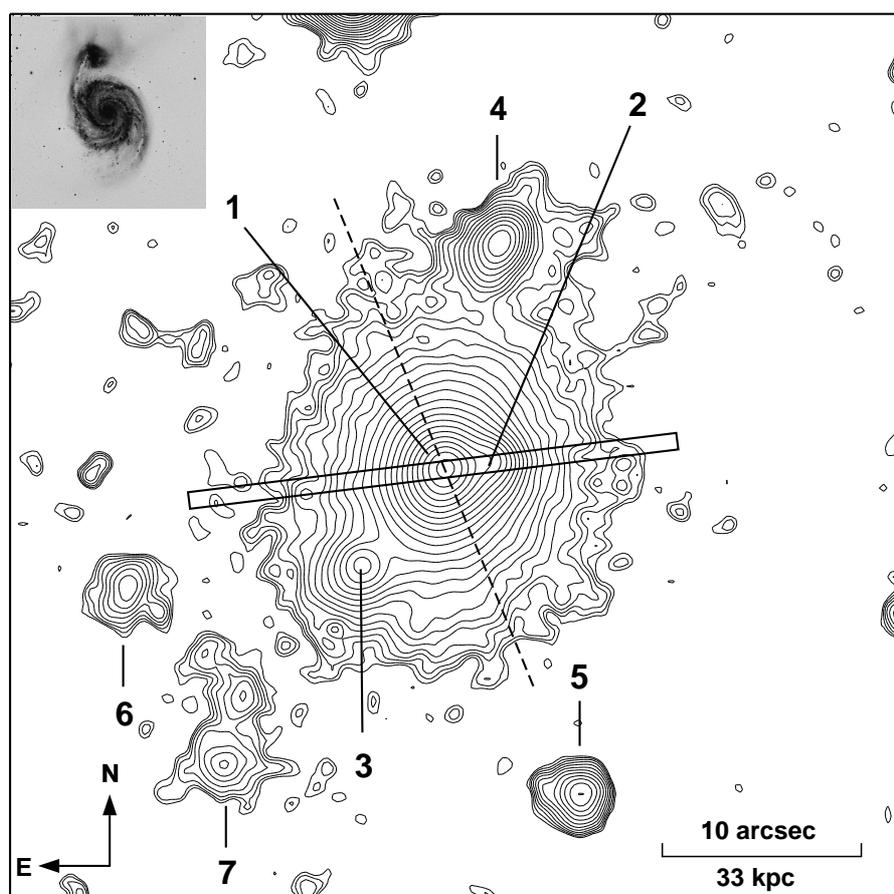


Abbildung 6.1: Optische Aufnahme von ISOSS J 15079+7247 im R-Band, erhalten mit der LAICA-Kamera am Calar Alto 3.5 m-Teleskop. Die elliptische Riesengalaxie (1) zeigt zwei schwächere Helligkeitsmaxima (2) und (3) innerhalb der logarithmisch aufgetragenen Isophoten. Einige schwächere Objekte in der Umgebung sind gekennzeichnet (4...7). Die Lage des Spalts während der spektroskopischen Beobachtungen (Kasten) und die große Achse (gestrichelt) der elliptischen Galaxie sind ebenfalls angedeutet. Zum Größenvergleich befindet sich in der oberen linken Ecke ein Bild von M 51, daß entsprechend der Entfernung von ISOSS J 15079+7247 skaliert wurde.

Die 1.2 mm Kontinuums-Beobachtungen mit MAMBO (Kreysa et al. 1998) am IRAM 30 m Teleskop wurden am 23. Oktober 2001 unter exzellenten atmosphärischen Bedingungen ($\tau_{1.2\ \text{mm}} = 0.1$) im On-Off Modus durchgeführt. Als Kalibrationsstandards dienen die Planeten Mars und Uranus. Die Messungen wurden mit dem Programmpaket NIC ausgewertet, das spezielle Pro-

zeduren zur Reduktion von korreliertem Himmelsrauschen einschließt. Die erreichte photometrische Genauigkeit beträgt 20 %.

Millimeter-Spektroskopie der CO(1–0) Emission wurde mit dem IRAM 30 m-Teleskop am 3. März 2002 erhalten. Die A100 und B100 Heterodyn-Empfänger wurden simultan im Beobachtungsmodus des “position switching” eingesetzt. Die Systemtemperatur betrug 115 K. Zur spektroskopischen Analyse kamen sowohl eine 512×1 MHz Filterbank, als auch ein Autokorrelator zum Einsatz. In beiden Fällen betrug der überdeckte Geschwindigkeitsbereich der rotverschobenen CO(1–0) Linie 1600 km s^{-1} . Die Spektren wurden zur Erzielung eines höheren Signal-zu-Rausch-Verhältnisses zu spektralen Auflösungselementen von 10 MHz (32 km s^{-1}) zusammengefaßt. Die Intensitäten dieser Messung sind in Einheiten der Antennentemperatur gegeben. Am 30 m-Teleskop entspricht $T_{\text{mb}} = 1 \text{ K}$ der Flußdichte einer Punktquelle von 4.5 Jy im 3 mm Band.

Optische Langspalt-Spektren wurden mit dem TWIN Doppelspektrograph am Calar Alto 3.5 m-Teleskop am 30 April 2002 mit spektralen Dispersionen von 0.55 \AA/pixel im blauen (3400–5500 \AA) und 2.4 \AA/pixel im roten (5500–9300 \AA) Kanal bei einer Spaltbreite von $1.5''$ aufgenommen. Die relative spektrophotometrische Genauigkeit beträgt 15 % . Die Extraktion der Spektren erfolgte mit Hilfe der Methode von Horne (1986). Die Spektren wurden für den Einfluß atmosphärischer Extinktion korrigiert. CCD-Direktaufnahmen (Pixelgröße $0.225''$) wurden mit LAICA (Large Area Imager for Calar Alto) am Calar Alto 3.5 m-Teleskop im B-Band (seeing $\sim 1.5''$) durchgeführt. Photometrie im I-Band konnte mit dem MPIA 0.7 m-Teleskop (Pixelgröße $0.89''$) gewonnen werden.

Zusätzliche Messungen der Quelle existieren mit dem VLA im 21 cm-Kontinuum von Condon et al. (1998) und im Nahen Infrarot (JHK) im Rahmen der 2MASS-Durchmusterung (Cutri et al. 2000). Die Astrometrie aus 2MASS dient darüberhinaus als Referenz für die optischen Aufnahmen und hat eine Genauigkeit $< 0.5''$ rms.

6.3 Ergebnisse

Die tiefe optische Direktaufnahme im R-Band (Abb. 6.1) an der Position der ISOSS-Quelle zeigt eine elliptische Galaxie (1). Deren Helligkeitsprofil kann gut durch ein de Vaucouleur $r^{\frac{1}{4}}$ Profil (Abb. 6.3) mit einem effektiven Radius von $r_e = 1.1 \pm 0.1''$ beschrieben werden. Das Verhältnis von großer zu kleiner Achse wurde durch Anpassen einer zweidimensionalen de Vaucouleur-Funktion bestimmt und beträgt 1.2. Die Position des Helligkeitsmaximums (1) beträgt (J2000) RA $15^{\text{h}}07^{\text{m}}58.47^{\text{s}} \pm 0.1^{\text{s}}$, Dec $+72^{\circ}47'38.9'' \pm 0.5''$. Zwei weitere Maxima befinden sich $2.5''$ westlich (2) und $7''$ südöstlich (3) vom Kern. Darüberhinaus sind mehrere schwächere Objekte (4..7) in der Umgebung zu erkennen. Die Gesamthelligkeit im R-Band (Tab. 6.1) wurde durch Integration einer runden Apertur von $20''$ Durchmesser gewonnen und schließt daher eine Konfusion mit der benachbarten Quelle 4 aus.

Die elliptische Galaxie fällt mit einer nicht aufgelösten 1.2 mm Kontinuums-Quelle zusammen. Die Beobachtungen mit MAMBO zeigen, daß sich nur im zentralen Kanal des Bolometers (Winkeldurchmesser der Hauptkeule $\sim 10''$) starke Emission detektieren ließ (Abb. 6.2). Dies läßt auf eine Ausdehnung $\lesssim 10''$ im FIR/mm-Kontinuum schließen. Im Gesichtsfeld von MAMBO (Durchmesser $\sim 100''$), das mit der Auflösung von ISOPHOT ($1.5'$) übereinstimmt, ist keine weitere Quelle zu erkennen. Im Rahmen der Positionsfehler kommen nur die Helligkeitsmaxi-

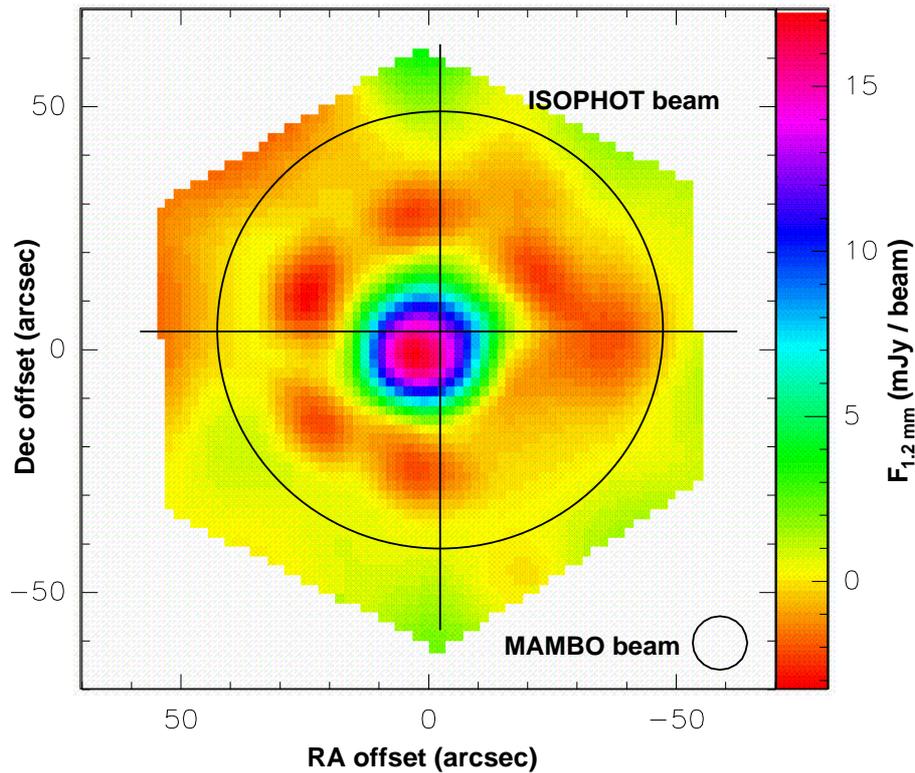


Abbildung 6.2: 1.2 mm Kontinuums-Karte von ISOSS J 15079+7247 mit der MAMBO Bolometer-Kamera. Die Größen der Hauptkeulen von ISOPHOT und MAMBO sind angedeutet.

ma (1) und (2) der Aufnahme im R-Band als mögliche optische Gegenstücke der Staubemission in Frage. Der von Moran et al. (1996) als Gegenstück vorgeschlagene M-Stern $30''$ nördlich der elliptischen Galaxie kann nun mit Sicherheit ausgeschlossen werden.

Tabelle 6.1: Photometrie von ISOSS J 15079+7247.

Band	Fluß	Quelle
R	17.44 ± 0.15 mag	LAICA, $20''$ Apertur
I	16.60 ± 0.15 mag	0.7m-Tel., $20''$ Apertur
J	15.7 ± 0.2 mag	bestimmt aus 2MASS Aufnahmen
H	15.1 ± 0.2 mag	2MASS
K	14.1 ± 0.2 mag	2MASS
$12 \mu\text{m}$	< 54 mJy	IRAS FSC
$25 \mu\text{m}$	< 46 mJy	IRAS FSC
$60 \mu\text{m}$	0.53 ± 0.08 Jy	IRAS FSC
$100 \mu\text{m}$	1.66 ± 0.25 Jy	IRAS FSC
$170 \mu\text{m}$	2.0 ± 0.6 Jy	ISOPHOT $1.5'$ Beam
$1200 \mu\text{m}$	16.4 ± 2.4 mJy	MAMBO $11''$ Beam
21 cm	5.3 mJy	Condon et al. (1998)

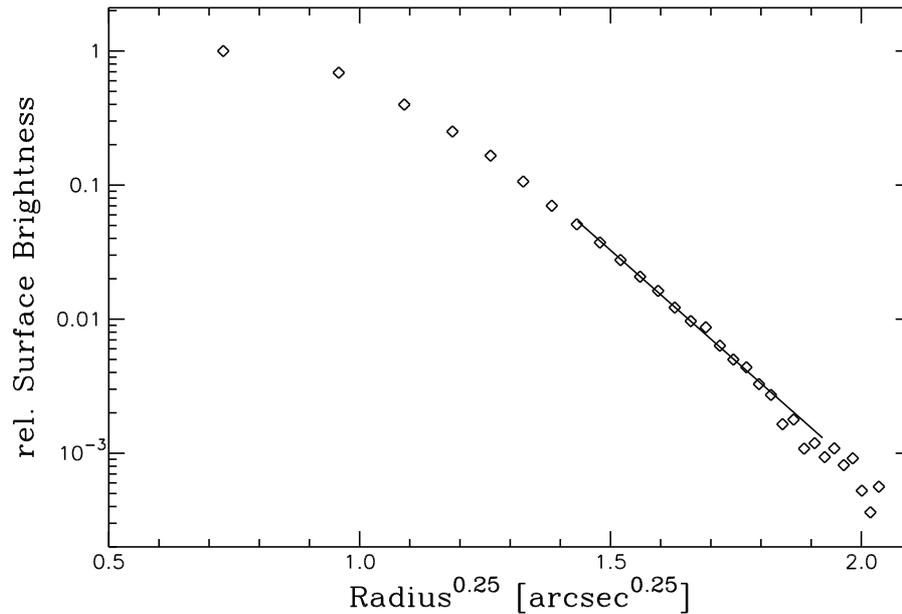


Abbildung 6.3: Flächenhelligkeit im R-Band aufgetragen über dem Radius der großen Achse. Die gemessene Abhängigkeit kann im weiter außen liegenden Bereich, in dem das Seeing und eine mögliche zentrale Punktquelle einen geringen Einfluß haben, sehr gut durch ein de Vaucouleur $r^{1/4}$ -Gesetz beschrieben werden (Gerade). Der effektive Radius des mit der χ^2 -Methode gefundenen Parametrisierung beträgt 3.5 ± 0.2 kpc.

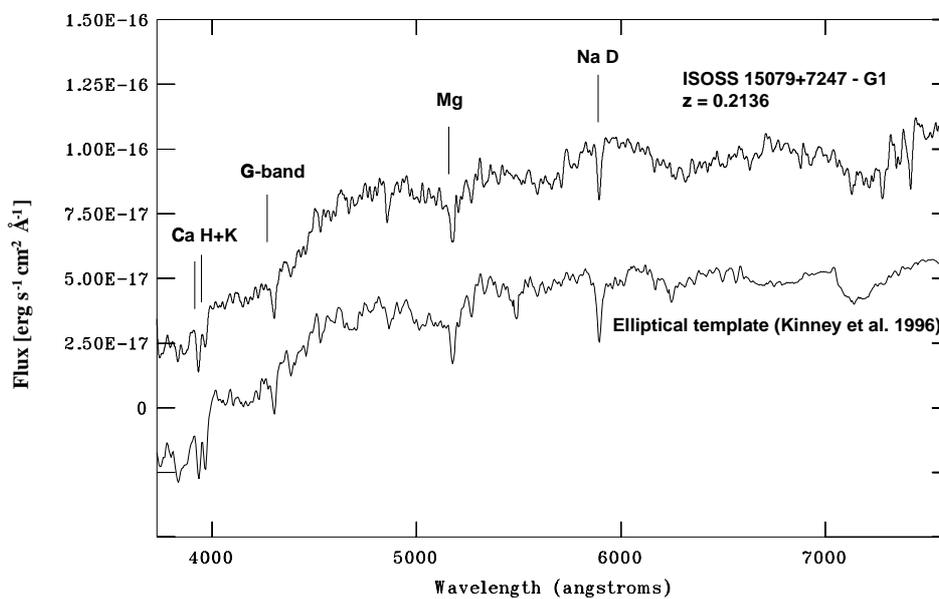


Abbildung 6.4: Optisches Spektrum von ISOSS J 15079+7247, aufgenommen in Richtung des hellen Kerns der elliptischen Galaxie (1). Die zur Integration des Spektrums verwendete Meßapertur ist ein Ausschnitt des Spaltes von $3''$ östlich bis $1''$ westlich des Kerns und vermeidet so den Einfluß des Emissionsgebiets (2). Die Wellenlänge bezieht sich auf das Ruhesystem ($z = 0.2136$) der Galaxie. Ein Vergleichsspektrum elliptischer Galaxien ist darunter gezeigt.

Um die möglichen Gegenstücke (1) und (2) aufgrund ihrer Kinematik zu unterscheiden, wurde eine optische Langspaltspektroskopie durchgeführt. Die Spaltlage (siehe Abb. 6.1) durch beide

Helligkeitsmaxima ermöglichte die gleichzeitige Messung beider Emissionskomponenten.

Die Spektren zeigen ein reines Absorptionsspektrum (Abb. 6.4) an der Zentralposition der elliptischen Galaxie (1). Die aus den Absorptionslinien Ca H & K und Na D sowie dem G-Band abgeleitete Rotverschiebung beträgt $z = 0.2136 \pm 0.0005$, entsprechend einer Leuchtkraftentfernung von $D_L = 985 \text{ Mpc}$. Die verwendeten kosmologischen Parameter sind $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ sowie $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. In Richtung des westlichen Helligkeitsmaximums (2) wurde ein Emissionslinienspektrum beobachtet (siehe Abb. 6.5). Die gemessenen Linienstärken (Tab. 6.2) klassifizieren das Objekt als Typ III (Veilleux & Osterbrock 1987). Das Emissionsmaximum (2) ist relativ zum Kern der elliptischen Galaxie um eine Geschwindigkeit von 478 km s^{-1} blauverschoben. Die Neigung der Spektrallinien über einen Geschwindigkeitsbereich von $\sim 250 \text{ km s}^{-1}$ lassen sich entweder durch Rotation einer Begleitgalaxie oder Massenausfluß- oder Einfall zum Zentrum der elliptischen Galaxie erklären.

Das an der Stelle der mm-Kontinuums-Quelle aufgenommene $^{12}\text{CO}(1-0)$ Moleküllinienspektrum (Abb. 6.6) zeigt ein Emissionsmaximum bei der Rotverschiebung von 0.2136 ± 0.0001 , in Übereinstimmung mit der optischen Rotverschiebung der elliptischen Galaxie. Die durch Anpassung einer Gauss-Funktion erhaltene Linienbreite beträgt $\Delta v = 250 \text{ km s}^{-1}$. Die über den Geschwindigkeitsraum integrierte Linienintensität von 0.61 K km s^{-1} ergibt eine molekulare Gasmasse von $M(\text{H}_2) = 2.9 \times 10^{10} M_\odot$. Zur Bestimmung der Gasmasse wurde ein Konversionsfaktor $\text{CO} \rightarrow \text{H}_2$ von $4.6 M_\odot \text{ pc}^{-2} \text{ K}^{-1}$ nach Solomon et al. (1997) verwendet. Es gibt Hinweise, daß der Konversionsfaktor für einige ultraleuchtkräftige Infrarot-Galaxien um einen Faktor 2-3 (Downes & Solomon 1998) niedriger sein könnte. Dies hätte eine Reduktion der Gasmassen um denselben Faktor zur Folge.

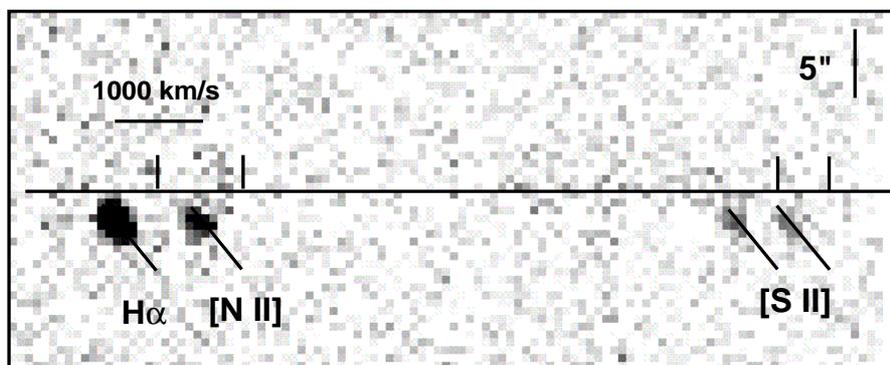


Abbildung 6.5: Spektroskopische Aufnahme der atomaren Linienemission aus der Begleitgalaxie (2). Die Abszisse entspricht dabei dem Geschwindigkeits-, die Ordinate dem Ortsraum. Die Maßstäbe beider Achsen sind angedeutet. Für diese Darstellung wurde vom ursprünglichen Spektrum der Beitrag des Kontinuums subtrahiert. Die waagrechte Linie kennzeichnet die Lage des Kerns der elliptischen Galaxie. Die vertikalen Linien markieren die Positionen der Emissionslinien $\text{H}\alpha$, $[\text{N II}]$ und $[\text{S II}]$ im Ruhesystem der elliptischen Galaxie. Die geneigten Spektrallinien deuten auf einen Geschwindigkeitsgradient entlang der Begleitgalaxie hin.

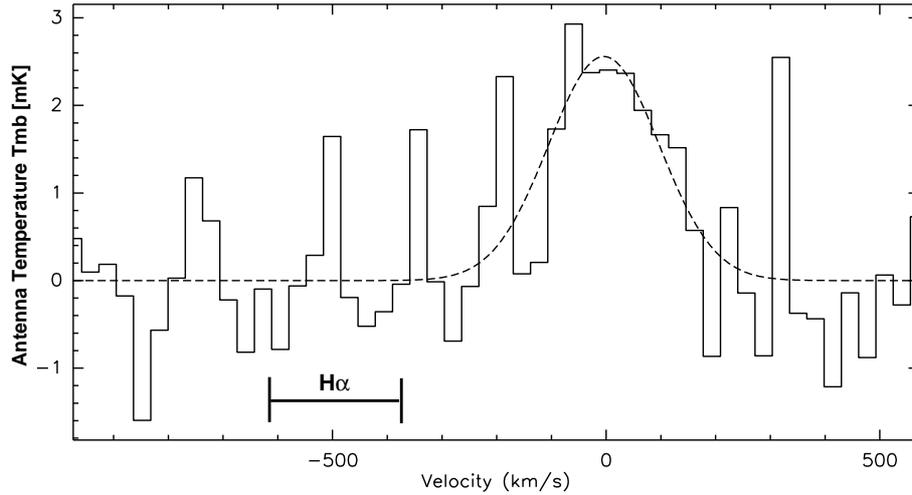


Abbildung 6.6: Spektroskopie der CO (1-0) Linie von ISOSS J 15079+7247 bei 95 GHz, aufgenommen mit dem IRAM 30 m-Teleskop. Der Nullpunkt des Geschwindigkeitsachse wurde entsprechend der optischen Rotverschiebung der elliptischen Galaxie gesetzt. Der beobachtete Geschwindigkeitsbereich optischer H α -Emission aus der Begleitgalaxie (2) um die Relativgeschwindigkeit -500 km s^{-1} ist gekennzeichnet.

Tabelle 6.2: Beobachtete Emissionslinien im optischen Spektrum der Begleitgalaxie (2) von ISOSS J 15079+7247.

Linie	Beob. Wellenlänge [Å]	Fluß [$10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Å}^{-1}$]	
		beobachtet	Ext.korr.
[O II] 3726	4515.86	1.12	78.7
[O II] 3729	4519.16	0.57	40.1
H γ	5259.46	0.34	14.0
H β	5893.06	1.25	31.2
[O III] 5007	6068.60	0.98	21.7
[N II] 6548	7936.06	0.66	6.4
H α	7953.79	9.49	90.9
[N II] 6584	7978.17	2.89	27.4
[S II] 6717	8139.98	1.29	11.6
[S II] 6731	8156.68	1.15	10.2

6.4 Diskussion

Im folgenden werden die abgeleiteten Eigenschaften von ISOSS J 15079+7247 aufgeführt, die belegen, daß es sich bei der Quelle um eine gasreiche elliptische Riesengalaxie mit einem zentralen Sternentstehungsausbruch (engl. Starburst) handelt.

6.4.1 Molekulares Gas

Die Übereinstimmung der beobachteten Rotverschiebung der CO-Linie mit der optischen Rotverschiebung der elliptischen Galaxie weist stark darauf hin, daß das molekulare Gas auch räumlich mit dieser Galaxie assoziiert ist. Durch die Rotverschiebung der Quelle entspricht die gemessene Helligkeit im R-Band weitgehend der V-Band Helligkeit im Ruhesystem der elliptischen Galaxie. Nach Anwendung einer K-Korrektur erster Ordnung von $K = 2.5 \log(1 + z)$ mag folgt für das Objekt eine Absolutelligkeit von $M_V \sim -22.7$ mag. Diese Helligkeit und der effektive de Vaucouleur-Radius von $r_e = 3.5$ kpc klassifizieren die Galaxie als Rieseneclipse. Wie in den Abb. 6.4 und 6.7 gezeigt, stimmt das beobachtete optische Spektrum gut mit dem Vergleichsspektrum einer entwickelten elliptischen Galaxie (Kinney et al. 1996, Bruzual & Charlot 1995) überein. Die große Masse molekularen Wasserstoffs von $M(\text{H}_2) = 2.9 \times 10^{10} M_\odot$ in einem solchen Objekt ist beachtlich. Bisher wurden deutlich geringere Mengen molekularen Gases in elliptischen Galaxien beobachtet (siehe z.B. Henkel & Wiklind 1997).

6.4.2 Hohe Staubmasse

Die spektrale Energieverteilung im fernen Infrarot und mm-Bereich (Fig. 6.7) kann entweder durch modifizierte Schwarzkörper-Strahlung *zweier optisch dünner Komponenten* mit Staubtemperaturen von 18 und 33 K (gestrichelte Linie), oder durch *einen einzigen optisch dicken* modifizierten Schwarzkörper von 42 K und einer optischen Tiefe von $\tau_{100 \mu\text{m}} = 3.5$ (durchgezogene Linie) charakterisiert werden. Für den Staubemissivitätsindex wurden Werte von $\beta = 2$ für die optisch dünne bzw. $\beta = 1.5$ für die optisch dicke Staubkomponente angenommen. Die abgeleiteten Staubmassen für das optisch dicke bzw. optisch dünne Staubmodell sind $M_d = 5.4 \times 10^8 M_\odot$ bzw. $M_d = 2.7 \times 10^9 M_\odot$. Da die durchgeführte 1.2 mm Messung einer Ruhewellenlänge von $990 \mu\text{m}$ entspricht, wurde für die Berechnung ein Absorptionskoeffizient des Staubes von $\kappa_{990 \mu\text{m}} = 0.64 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ nach Lisenfeld et al. (2000) angenommen.

6.4.3 Gas-zu-Staub-Massenverhältnis

Die abgeleiteten Staubmassen erlauben die Bestimmung des Gas-zu-Staub Massenverhältnisses $(M_{\text{H}_2} + M_{\text{HI}})/M_d$, die 20 und 110 für die optisch dünnen bzw. optisch dicken Staubmodelle betragen (unter der Annahme $M_{\text{H}_2} = M_{\text{HI}}$). Da das optisch dicke Modell dem Wert von ~ 100 – 300 für Galaxien (Sodroski et al. 1997, Dunne & Eales 2001) entspricht, soll im folgenden von dieser Annahme ausgegangen werden. Die Möglichkeit eines kleineren CO-zu-H₂ Konversionsfaktors verleiht dieser Folgerung zusätzliches Gewicht.

6.4.4 Hohe Sternentstehungsrate

Unter der Annahme, daß ein starker Starburst die Energiequelle der Infrarot-Emission ist, entspricht die bolometrische Leuchtkraft $L_{\text{FIR}}(40 - 1000 \mu\text{m}) = 1.9 \times 10^{12} L_\odot$ nach Kennicutt (1998) einer Sternentstehungsrate von $325 M_\odot \text{ yr}^{-1}$. Diese hohe Sternentstehungsrate drückt sich auch im großen Verhältnis von Infrarot- zu Blau-Leuchtkraft $L_{\text{IR}} / L_B = 107$ aus. Der Mindestradius, der erforderlich ist, um die beobachtete Leuchtkraft im fernen Infraroten aus einer optisch dicken Schwarzkörperkugel abstrahlen zu können, beträgt nach Klaas et al. (2001)

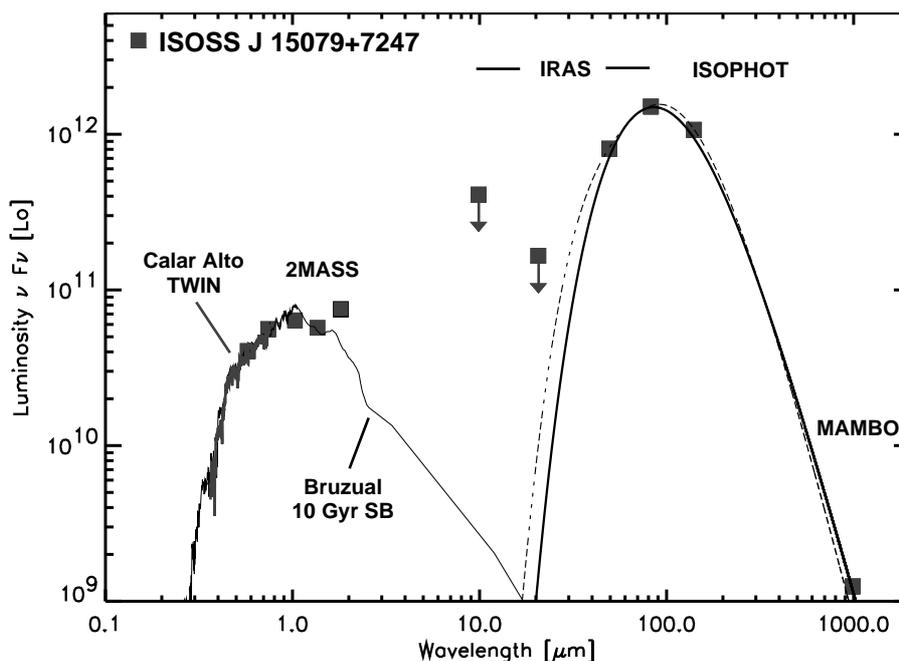


Abbildung 6.7: Spektrale Energieverteilung von ISOSS J 15079+7247 im Ruhesystem, basierend auf den Flüßen und instrumentellen Aperturen aus Tab. 6.1. Die Staubemission im fernen Infrarot und mm-Bereich kann durch zwei Staubmodelle charakterisiert werden: Durch einen optisch dicken modifizierten Schwarzkörper (durchgezogene Linie) oder durch die Überlagerung zweier optisch dünner modifizierter Schwarzkörper (gestrichelte Linie); nähere Erläuterungen dazu im Text. Die Emission im Optischen und nahen Infrarot kann nach Bruzual & Charlot 1995 durch eine 10 Gyr alte stellare Population beschrieben werden.

$r_b = 600$ pc. Aus der FIR/Radio-Korrelation (Condon 1992) folgt, daß im Falle eines Starbursts eine nicht-thermische Strahlungskomponente im cm-Kontinuum detektiert werden sollte. Frühere cm-Kontinuuma-Beobachtungen mit dem Very Large Array (VLA) von Condon et al. (1998) zeigen in der Tat, daß eine derartige kompakte Kontinuums-Quelle am Ort der elliptischen Galaxie vorhanden ist. Die gemessene Flußdichte von 5.3 mJy bei 21 cm ergibt nach Yun et al. (2001) eine Sternentstehungsrate von $299 M_\odot \text{ yr}^{-1}$ und ist konsistent mit dem Wert, der aus der Leuchtkraft im fernen Infrarot abgeleitet wurde. Es gibt keinen Hinweis auf das Vorhandensein eines starken aktiven galaktischen Kerns (AGN), da ISOSS J 15079+7247 weder im Radiobereich noch im mittleren Infrarot eine erhöhte Strahlung zeigt, wie sie von einem solchen Objekt erwartet würde.

6.4.5 Hinweise auf einen verborgenen Sternentstehungsausbruch

Trotz der hohen räumlichen Auflösung des VLA in seiner A-Konfiguration ist die Quelle im cm-Kontinuum kaum aufgelöst. Die entfaltete Größe von $\sim 1.5 \times 0.5 \text{ arcsec}^2$ ($HWHM$) ($= 4.8 \times 1.6 \text{ kpc}^2$) kann deshalb als obere Grenze für die Größe des Gebietes angesehen werden, in dem die starke Sternentstehung stattfindet. Dies stimmt mit der Abschätzung einer unteren Grenze von $r_b = 0.6 \text{ kpc}$ aus den Beobachtungen im fernen Infrarot gut überein. Unter der Annahme eines mittleren Radius von 1 kpc für den zentralen Starburst und einer kugelsymmetrischen Verteilung von Staub und Gas kann eine Säulendichte von $N(\text{H}) = 1.7 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ in Richtung des Zentralgebiets abgeleitet werden. Dies entspricht einer Extinktion von $A_V \sim 1000 \text{ mag}$ im

optisch sichtbaren Spektralbereich und erklärt die Abwesenheit jeglicher optischer Linienemission an der dortigen Stelle, was für Infrarotgalaxien dieser Leuchtkraft äußerst ungewöhnlich ist (Veilleux et al. 1999).

6.4.6 Die Rolle der Begleitgalaxie

Das nahegelegene Helligkeitsmaximum (2) ist in der großen Apertur der Ferninfrarot-Messungen eingeschlossen und besitzt ein Emissionslinienspektrum und die Helligkeit einer typischen Spiralgalaxie mit starker Sternentstehung. Aus den gemessenen Linienverhältnissen $H\beta/H\alpha$ und $H\gamma/H\beta$ (Tab. 6.2) kann eine optische Extinktion von $A_V = 3.0 \pm 0.2$ mag abgeleitet werden. Dazu wurde Rekombination mit einer Elektronentemperatur von 10000 K und eine niedrige Elektronendichte $\sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$ angenommen. Diese Elektronendichte konnte aus Messungen der Linienverhältnisse $[SII] \lambda 6716/\lambda 6731$ und $[OII] \lambda 3729/\lambda 3726$ bestimmt werden. Um den Flußverlust aufgrund der Messung in der nur $1.5''$ großen Spaltbreite zu korrigieren, wurden die gemessenen Flüsse mit einem Faktor 2 multipliziert, der als Aperturkorrektur für Galaxien bei $z \sim 0.2$ von Tresse & Maddox (1998) bestimmt wurde. Damit kann nach Kennicutt (1998) aus der $H\alpha$ -Leuchtkraft eine Sternentstehungsrate von $18 M_\odot \text{ yr}^{-1}$ abgeleitet werden. Zur Bestimmung der $H\alpha$ -Leuchtkraft wurde zuvor eine Extinktionskorrektur des Linienflusses durchgeführt (siehe Tab. 6.2). Eine unabhängige Bestimmung aus der $[OII]$ -Emission liefert ebenfalls eine Sternentstehungsrate von $18 M_\odot \text{ yr}^{-1}$. Die Sternentstehungsrate im Begleiter (2) ist damit ungefähr eine Größenordnung niedriger als die aus den Radio- und Infrarotbeobachtungen abgeleitete Rate der ganzen Quelle. Darüberhinaus zeigt das CO-Spektrum keine Linienemission am Ort der Rotverschiebung der Begleitgalaxie wie in Abb. 6.6 zu sehen ist. Es kann daher davon ausgegangen werden, daß die Galaxie (2) nicht Ursprung der starken Staub- und Gasemission ist. Das Objekt könnte jedoch in Wechselwirkung mit der elliptischen Galaxie stehen, möglicherweise mit ihr verschmelzen.

6.5 Neue Deutung der Submillimeter-Galaxie HDF850.1

Die Quelle HDF 850.1 ist die hellste mit SCUBA entdeckte Submillimeter-Galaxie im Bereich des Hubble Deep Field (Hughes et al. 1998). Trotz intensiver Anstrengungen und der Verfügbarkeit ausgezeichneter Datensätze in dieser Himmelsregion hat es im Laufe der letzten 10 Jahre unterschiedliche Deutungen zur Identifikation von HDF850.1 gegeben und bis heute ist das optische Gegenstück nicht zweifelsfrei bestimmt. Im folgenden soll gezeigt werden, daß die Natur von HDF 850.1 durch eine gas- und staubreiche elliptische Galaxie vom Typ ISOSS 15079+7279 erklärt werden kann.

Im Rahmen der Entdeckung der Submillimeter-Quelle durch Hughes et al. (1998) wurde die schwache Galaxie 3-577.0 bei einer Rotverschiebung von $z=3.5$ als wahrscheinlichstes Gegenstück angesehen, da sie der mit SCUBA bestimmten Position am nächsten war (siehe Abb. 6.8). Um die Identifikation mit 3-577.0 mit höherer räumlicher Auflösung zu bestätigen, beobachteten Downes et al. (1999) HDF850.1 mit dem IRAM-Interferometer und konnten dabei die Quelle bei 1.2 mm detektieren. Mit der aus diesen Messungen abgeleiteten Positionsgenauigkeit von $0.9''$ (3σ) konnte die bisherige Identifikation mit 3-577.0 mit hoher Wahrscheinlich-

keit ausgeschlossen werden. Interessanterweise war jedoch an der nun mit hoher Genauigkeit bestimmten Position kein eindeutiges optisches Gegenstück zu erkennen. Im Rahmen der Positionsfehler (siehe Abb. 6.8) kamen zwei Möglichkeiten in Frage: Eine elliptische Galaxie mit einer entwickelten stellaren Komponente (3-586.0) östlich, sowie eine Spiralgalaxie vom Typ Scd westlich der mm-Position (3-593.1).

Downes et al. (1999) schlossen daraus, daß lediglich die westliche Quelle in Frage kommt. Die elliptische Galaxie schied bei diesen Autoren sowie bei Hughes et al. (1998) aufgrund der Möglichkeit aus, daß ein solches Objekt nicht eine derart große Menge an Staub besitzen kann. Für keines der beiden Objekte (Helligkeiten im I-Band > 23.4 mag) konnte bisher die Radialgeschwindigkeit spektroskopisch gemessen werden. Eine photometrische Bestimmung der Rotverschiebung von Fernandez-Soto et al. (1999) liefert $z \sim 1.1$ für die elliptische und $z \sim 1.75$ für die Spiralgalaxie.

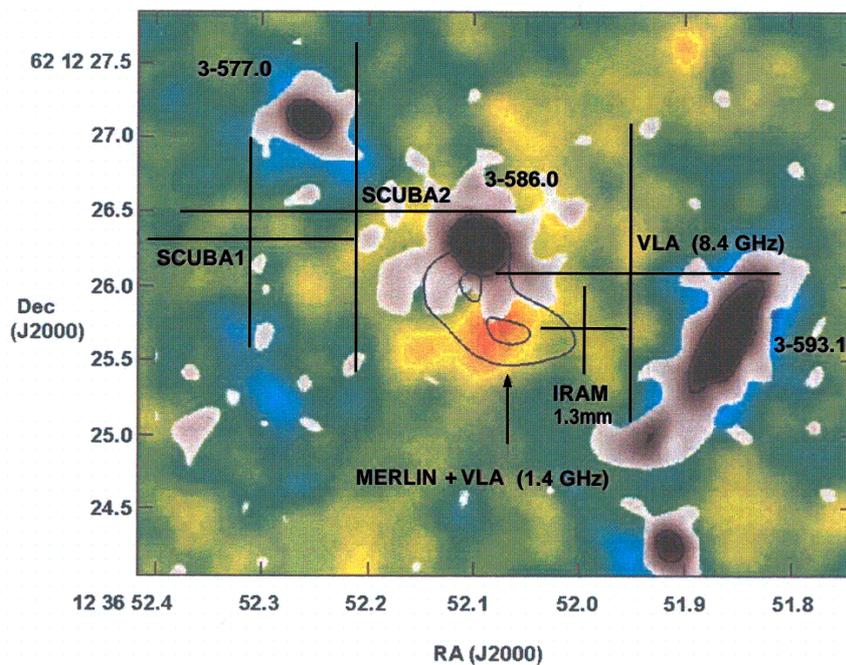


Abbildung 6.8: Aufnahme der Umgebung von HDF 850.1. Die HST I-Band Aufnahme (schwarz/weiß) ist einer J-K Farbkarte überlagert. Alle bisherigen Detektionen der Quelle einschließlich der astrometrischen Meßfehler (1σ) sind angegeben (aus Dunlop et al. 2002).

Neue Beobachtungsergebnisse dieser Quelle haben Dunlop et al. (2002) kürzlich vorgelegt. Diese schließen neue Messungen des HDF mit SCUBA (Serjeant et al. 2003) sowie die Verfügbarkeit von Daten hoher räumlicher Auflösung im cm-Kontinuum mit MERLIN (Muxlow et al. 1999) ein. Diese neuen Daten stellen die Interpretation von Downes in Frage, da deren Gegenstück nicht mehr mit der Astrometrie im cm-Kontinuum konsistent ist.

Die cm-Beobachtungen zeigen eine schwache Kontinuums-Quelle in Bereich der elliptischen Galaxie. Möglich sind jedoch auch zwei einzelne Punktquellen. Die Astrometrie des Hubble Deep Field wurde auf das radioastronomische Referenzsystem bezogen, sodaß systematische Positionsfehler minimiert wurden. Innerhalb dieser hohen Meßgenauigkeit kann hier geschlossen werden, daß zumindest ein Teil der Radiokontinuumsmission mit der Position der elliptischen Galaxie 3-586.0 assoziiert ist. Die Helligkeit der elliptischen Galaxie macht eine zufälli-

ge Positionsübereinstimmung mit der Radio-Quelle unwahrscheinlich. Die von Serjeant et al. (2003) aus der Flächendichte von Galaxien dieser Helligkeit abgeleitete Poisson'sche Wahrscheinlichkeit dafür, 3-586.0 innerhalb eines Abstands von $0.9''$ (3σ) um die interferometrische IRAM-Messung zu finden, beträgt etwa $P \sim 0.09$. Dennoch kommt auch bei Dunlop et al. (2002) die elliptische Galaxie nicht als mögliches Gegenstück in Betracht. Die Begründung folgt Downes et al. (1999) und schließt aus, daß eine elliptische Galaxie derart große Mengen an Staub enthalten kann, die sie zu einer hellen Quelle im Submillimeter-Bereich machen würde.

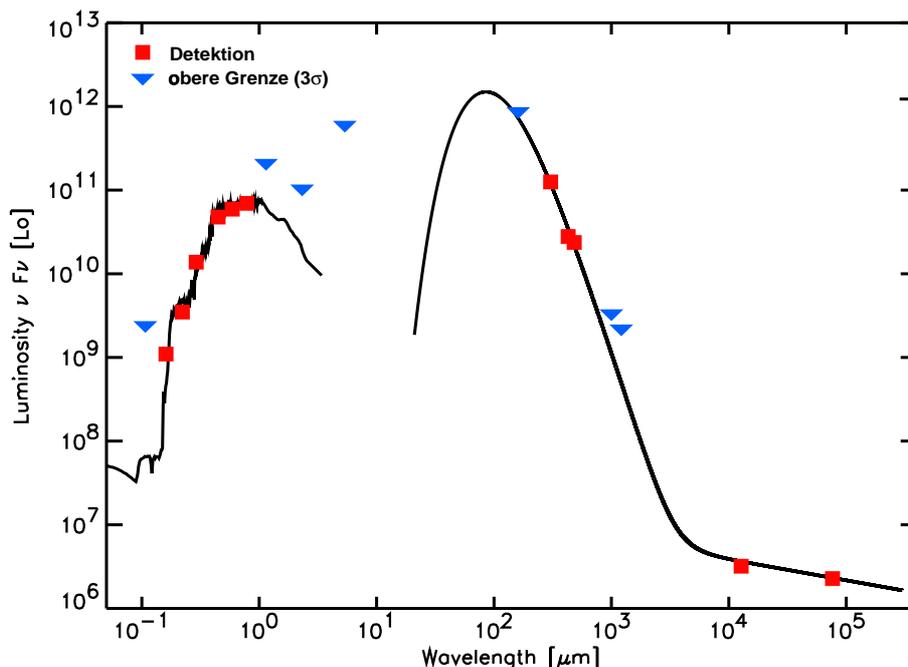


Abbildung 6.9: Spektrale Energieverteilung von ISOSS 15079+7247, verglichen mit Meßwerten von HDF850.1 und G3-586.0. Die Literaturdaten stammen aus Hughes et al. (1998), Aussel et al. (1999), Downes et al. (1999), Fernandez-Soto et al. (1999), Hogg et al. (2000) und Dunlop et al. (2002). Die SED von ISOSS 15079+7247 wurde entsprechend dem Rotverschiebungsverhältnis ($z = 0.2136 : z = 1.8$ für 3-586.0) skaliert. Das optische Spektrum ist durch einen 1 Gyr alten Starburst nach Bruzual & Charlot (1995) beschrieben.

Um die wahre Natur der Submillimeter-Quelle und deren Bezug zur Radioquelle zu untersuchen, wurden sehr tiefe Nah-Infrarotaufnahmen der Umgebung der elliptischen Galaxie am 8.2m SUBARU-Teleskop auf Mauna Kea, Hawaii, angefertigt (Kajisawa et al. 2003). Nach Subtraktion der hellen elliptischen Galaxie können Dunlop et al. (2002) ein äußerst schwaches Emissionsgebiet finden (rotes Objekt in Abb. 6.8), daß sie als wahrscheinlichstes Gegenstück der Submm-Quelle ansehen.

Alle bisherigen Deutungen der Quelle basieren dabei zu einem großen Teil auf dem Ausschluß der Quelle 3-586.0. Die Entdeckung der gas- und staubreichen elliptischen Galaxie ISOSS 15079+7247 hat jedoch gezeigt, daß dieses Ausschlußkriterium nicht notwendigerweise erfüllt sein muß. Abb. 6.9 zeigt die Meßwerte von HDF850.1 in Verbindung mit optischer und Nahinfrarot-Photometrie der elliptischen Galaxie 3-586.0. Überlagert ist die spektrale Energieverteilung von ISOSS 15079+7247. Wie der Vergleich zeigt, lassen sich alle Meßwerte (rot) und obere Flußgrenzen (blau) vom Optischen bis zum cm-Kontinuum durch die Annahme deuten,

daß 3-586.0 analog zu ISOSS 15079+7247 eine gas- und staubreiche elliptische Galaxie bei der Rotverschiebung $z \sim 1.8 \pm 0.15$ ist und diese das Gegenstück der Submillimeter-Quelle HDF850.1 darstellt. Beide Energieverteilungen sind im Ruhesystem der Quellen gegeben und K-korrigiert. Die im Vergleich zu Fernandez-Soto et al. (1999) höhere Rotverschiebung folgt aus der Anpassung einer jüngeren stellaren Komponente, die unter der Berücksichtigung der passiven Entwicklung elliptischer Galaxien gewählt wurde.

Da das Objekt auch die beste Positionsübereinstimmung mit den MERLIN+VLA und SCUBA-Messungen hat und aufgrund der großen Absolutelligkeit von 3-586.0 eine Zufallsübereinstimmung unwahrscheinlich ist, folgt, daß die elliptische Galaxie 3-586.0 der geeignetste Kandidat für das optische Gegenstück von HDF 850.1 ist. Ein Beweis dieser Hypothese könnte durch Detektion molekularen Gases bei der Rotverschiebung $z \sim 1.8$ erfolgen. Die stärkste Moleküllinie CO(1-0) kann bei dieser Rotverschiebung aufgrund atmosphärischer Absorption nicht beobachtet werden. Der energetisch nächste, beobachtbare Linie von Kohlenmonoxid ist CO(2-1). Das Verhältnis dieser Linien in optisch dicken Gas einer Anregungstemperatur von $T_{ex} \sim 20-50$ K beträgt $I_{2-1}/I_{1-0} \sim 0.9$ (Braine & Combes 1992). Unter der Annahme, daß auch die CO-Helligkeit von HDF 850.1 der von ISOSS 15079+7247 entspricht, könnte ein Fluß von 0.4 mJy für die Linienintensität von CO(2-1) erwartet werden. Zu dessen Nachweis reicht die Empfindlichkeit verfügbarer Teleskope aber derzeit kaum aus.

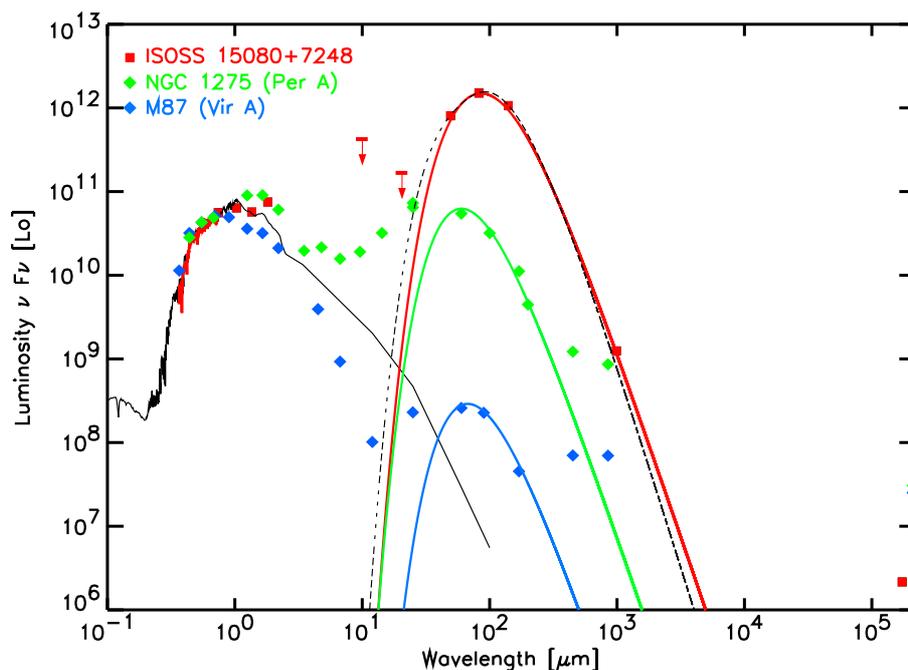


Abbildung 6.10: Vergleich der spektralen Energieverteilung von drei massereichen elliptischen Galaxien: ISOSS 15079+7247, Per A und M87.

Abb. 6.10 vergleicht die spektrale Energieverteilung von gas- und staubreichen elliptischen Galaxien der Klasse von ISOSS 15079+7247 mit der pekuliären Radiogalaxie Per A und der Zentralgalaxie der Virgo-Haufens, M87. Wie zu sehen ist, weisen alle im Optischen eine vergleichbare Helligkeit auf. Die Menge von Staub (und Gas) sowie der relative Anteil der nicht-thermischen Synchrotronstrahlung unterscheidet sich in den drei Quellen jedoch ganz erheblich. Aus dieser Beobachtung auf mögliche Entwicklungssequenzen zwischen den Quellen zu schließen, bleibt zukünftigen Untersuchungen vorbehalten.

6.6 Zusammenfassung

Im Rahmen von Nachfolgebeobachtungen kalter Galaxien der ISOPHOT Zufallsdurchmusterung konnte gezeigt werden, daß es sich bei der Quelle ISOSS J 15079+7247 um eine gas- und staubreiche elliptische Galaxie mit ultraleuchtkräftiger Infrarot-Emission handelt. Die Menge von Gas und Staub ist höher als in allen bekannten elliptischen Galaxien mit ähnlichen optischen Eigenschaften. Wegend der hohen Staubextinktion sind die Auswirkungen der starken Sternentstehung in ISOSS J 15079+7247 im optischen Spektralbereich unsichtbar. Diese Entdeckung zeigt, daß elliptische Galaxien nicht à priori als mögliche Gegenstücke leuchtkräftiger Infrarot- und Submillimeter-Galaxien ausgeschlossen werden können. Eine der bekanntesten Submillimeter-Galaxien, die hellste 850 μm Quelle im Hubble Deep Field, HDF 850.1, kann alternativ mit einem Objekt dieser Art gedeutet werden.

Kapitel 7

Ausblick

Himmelsdurchmusterungen haben in der Geschichte der Astrophysik oftmals zur Entdeckung neuer Objektklassen geführt. Das Entdeckungspotential war besonders dann hoch, wenn ein neuer Spektralbereich erschlossen wurde. Einige Erwartungen gab es deshalb auch in die ISO-PHOT Zufallsdurchmusterung, die erstmalig einen großen Teil des Himmels mit hoher räumlicher Auflösung im fernen Infrarotbereich bis $240 \mu\text{m}$ kartierte. Die während unregelmäßig über den ganzen Himmel verlaufender Schwenks des ISO-Satelliten aufgenommenen Daten ergänzen die Gesamthimmelsdurchmusterung des IRAS-Satelliten wesentlich und erlauben den empfindlichen Nachweis thermischer Strahlung von Quellen mit Staubtemperaturen von 15-20 K. Die in der vorliegenden Dissertation beschriebene Entdeckung neuer Klassen von kalten massereichen Sternentstehungsgebieten sowie (ultra)leuchtkräftigen Galaxien mit einer dominierenden kalten Staubkomponente zeigen, daß die Erwartungen Neues zu finden, voll erfüllt werden konnten.

Bodengebundene Nachfolgebeobachtungen mit leistungsfähigen Teleskopeinrichtungen und Instrumenten (UKIRT/MAX, JCMT/SCUBA, IRAM30m/MAMBO, Effelsberg 100m, Calar Alto) über einen weiten Wellenlängenbereich erlaubten die konsistente Deutung der physikalischen Natur zweier solcher kalter ISOSS-Quellen (siehe Kapitel 4 bzw. 6). Um die während der Doktorarbeit begonnenen Nachfolgebeobachtungen statistischer Stichproben von Sternentstehungsregionen und Galaxien zu detaillierten Untersuchungen ihrer physikalischen Bedingungen auszubauen, sind weiterführende Beobachtungsprogramme definiert und teilweise bereits aufgenommen worden. Deren wissenschaftliche Zielsetzung und Beobachtungsstrategie soll im folgenden kurz vorgestellt werden.

Massereiche Sternentstehungsgebiete: In den bereits gewonnenen 450 und $850 \mu\text{m}$ Karten sind eine Reihe kalter Kondensationen hoher Masse zu erkennen, die keine Emission im mittleren Infrarot aufweisen. Solche Objekte sind Kandidaten für prästellare Kerne massereicher Sterne oder ganzer Sternhaufen. Ammoniak-Beobachtungen mit einer räumlichen Auflösung von $1''$ erlauben die präzise Ableitung von Eigenschaften des dichten Gases in diesen kompakten ($r \sim 0.1 \text{ pc}$) Objekten, sowie die Verifikation, ob es sich tatsächlich um gravitationsgebundene, kalte ($T \sim 12 \text{ K}$) und massereiche Wolkenkerne ($M \sim 300 M_{\odot}$) handelt. Kürzlich konnte eine erste ISOSS-Quelle mit diesem Verfahren am Very Large Array (VLA) in New Mexico beobachtet werden. Die Ergebnisse werden mit Spannung erwartet, da ein prästellarer Kern mit diesen Eigenschaften bisher noch nicht gefunden werden konnte.

Ob massereiche Sterne durch einen zentralen Gravitationskollaps oder durch Koagulation mas-

seärmerer prästellarer Kerne oder junger Sterne entstehen ist zur Zeit ebenfalls unbekannt. Um dies zu untersuchen wurde Molekülinienspektroskopie am IRAM 30m-Teleskop vorgeschlagen. Charakteristische Linienprofile in Paaren aus optisch dicken und dünnen Linien wie etwa HCO^+ (3-2) und $^{13}\text{HCO}^+$ (3-2) würden den Nachweis von Masseneinfall erlauben. Der Antrag ist genehmigt und wartet gegenwärtig auf Zuteilung von Beobachtungszeit.

Neben Untersuchungen des kalten und dichten Gases sind Beobachtungen von assoziierten jungen stellaren Objekten wichtig zur Charakterisierung des Entwicklungszustandes in den ISOSS-Quellen. So sind am Calar Alto 3.5m-Teleskop für den Herbst 2003 bereits mehrere Nächte Beobachtungszeit mit der Weitfeld-Nahinfrarotkamera OMEGA2000 für eine Stichprobe von ISO-Quellen eingeplant worden. Sie werden die Suche nach massearmen jungen Sternen in der Umgebung kalter massereicher Protosterne zur Charakterisierung der stellaren Massenverteilung erlauben.

Ab dem Jahre 2007 werden mit dem europäischen Weltraumteleskop HERSCHEL empfindliche Ferninfrarotmessungen hoher räumlicher Auflösung durchführbar sein. Mit ihnen wird es möglich sein, einen vollständigen Zensus prästellarer Kerne bis hinab zu niedriger Masse zu erhalten, um so das Zustandekommen der stellaren Massenfunktion genauer beschreiben zu können. Da die ISO-Arbeitsgruppe am MPIA an der langwelligen FIR-Kamera PACS beteiligt ist, wird gegenwärtig im Rahmen von Garantiezeit ein Beobachtungsprogramm für kalte ISOSS-Quellen vorbereitet.

Ergänzt werden sollen die Untersuchungen massereicher Sternentstehungsgebiete mit Quellen, die bei $170 \mu\text{m}$, jedoch nicht bei $100 \mu\text{m}$ detektiert wurden. Mehr als 30 solche Quellen mit besonders niedrigen Farbtemperaturen konnten bei der Kreuzkorrelation mit den Bell ^{13}CO und FCRAO ^{12}CO Moleküliniendurchmusterungen identifiziert werden.

Kalte Galaxien: Beobachtungen der CO-Emission könnten zusätzlich zu den HI-Messungen wichtige Information über molekulares Gas liefern. Die Kombination von Messungen des molekularen/atomaren Gases sowie des Staubs würde den vorliegenden Datensatz hervorragend für eine detaillierte Untersuchung des Gas-zu-Staub-Verhältnisses in Galaxien geeignet machen.

Die Entdeckung der gas- und staubreichen elliptischen Galaxie ISOSS J 15079+7247 führte zu dem Vorschlag, die Submillimeter-Galaxie HDF850.1 mit der elliptischen Galaxie HDF 3-586.0 zu identifizieren. Ein eindeutiger Beweis dafür kann ausschließlich durch die Messung der Rotverschiebung molekularen Gases in der Submillimeter-Quelle und deren Übereinstimmung mit der optischen Rotverschiebung von 3-586.0 erfolgen. Beobachtungstechnisch ist dies mit den gegenwärtigen Teleskopen bei dieser Quelle sehr schwierig. Vor allem ALMA wird jedoch über ausreichend Empfindlichkeit und spektrale Bandbreite verfügen, um solche spektroskopischen Identifikationen einer großen Zahl von Submillimetergalaxien routinemäßig durchführen zu können.

Teile dieser Dissertation wurden an folgenden Stellen veröffentlicht:

In referierten Zeitschriften

Krause, O., Lisenfeld, U., Lemke, D., Haas, M., Klaas, U., Stickel, M., 2003, "A gas and dust rich giant elliptical galaxy in the ISOPHOT Serendipity Survey", A&A 402, L1

Krause, O., Lemke, D., Tóth, L.V., Klaas, U., Haas, M., 2003, "A very young star forming region detected by the ISOPHOT Serendipity Survey", A&A 398, 1007

Toth, L.V., Hotzel, S., Krause, O. Lehtinen, K. et al., 2000, "ISOPHOT Serendipity Survey observations of interstellar clouds I. Detection of the Coldest Cores in Chamaeleon", A&A 364, 769

In Konferenzbänden

Krause, O., Lemke, D., Vavrek, R. et al., 2003, "Very young intermediate and high mass star forming regions discovered by the ISOPHOT Serendipity Survey", in Proc. "Galactic star formation across the stellar mass spectrum", ed. J. De Buizer, ASP conference series 287, 174

Krause, O., Vavrek, R., Klaas, U. et al., 2003, "Cold dust in luminous star forming regions", in Proc. "The Interaction of Stars with their Environment II", eds. Cs. Kiss, M. Kun & V. Könyves, Communications of the Konkoly Observatory 103, 37

Krause, O., Lisenfeld, U., Klaas, U. et al., 2003, "ISOPHOT's Serendipity Survey discovers an unusually cold ultraluminous infrared galaxy", in Proc. "Exploiting the ISO Data Archive - Infrared Astronomy in the Internet Age", ed. C.Gry et al., ESA SP-511, 285

Krause, O., Tóth, L.V., Vavrek, R. et al., 2003, "Follow-Up studies of very young intermediate and high mass star forming regions detected by the ISOPHOT Serendipity Survey", in Proc. "Exploiting the ISO Data Archive - Infrared Astronomy in the Internet Age", ed. C.Gry et al., ESA SP-511, 133

Krause, O., Liesenfeld, U., Lemke, D. et al., 2003, "A gas and dust rich giant elliptical galaxy", in Proc. "Highlights of Astronomy presented at the XXVth General Assembly of the IAU Sydney", im Druck

Literaturverzeichnis

- Acosta-Pulido, J.A., Gabriel, C. & Castaneda, H. O., 2000, *Exp. Astr.* 10, 333
- André, P., Ward-Thompson, D. & Barsony, M., 1993, *ApJ* 406, 122
- Andrillat, Y., Jaschek, M., Jaschek, C., 1988, *A&AS* 72, 129
- Appenzeller, I. & Mundt, R., 1989, *A&ARv* 1, 291
- Auer, L.H. & Mihalas, D., 1973, *ApJS* 223, 433
- Aussel, H., Cesarsky, C.J., Elbaz, D. & Starck, J.L., 1999, *A&A* 342, 313
- Bachiller, R., 1996, *ARA&A* 34, 111
- Baars, J.W.M., Genzel, R., Pauliny-Toth, I.I.K. et al. 1977, *A&A* 61, 99
- Becker, R. H., White, R. L., & Helfand, D. J. 1995, *ApJ*, 450, 559
- Becklin, E.E. & Horn, M.M., 2000, in Proc. "ISO Surveys of a Dusty Universe" eds. Lemke D., Stickel, M. & Wilke, K., *Lecture Notes in Physics* 548, 416
- Beichman, C. A., Neugebauer, G., Habing, H. J., 1988, "IRAS Catalogs and Atlases, Explanatory Supplement", NASA RP-1190, Vol. 1
- Bergin, E.A., Alves, J., Huard, T. et al., 2002, *ApJ* 570, 101
- Berrilli, F., Cociulo, G., Ingrassio, G. et al., 1992, *ApJ* 398, 254
- Bertin, E., Arnouts, S., 1996, *A&AS* 117, 393
- Bessel, M.S. & Brett, J.M., 1988, *PASP* 100, 1134
- Beuther, H., 2002, "Early stages of massive star formation", Dissertation, Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- Bianchi, S., Davies, J.I., Alton, P.B. et al., 2000, *A&A* 353 , L13
- Bianchi, S., Goncalves, J., Albrecht, M. et al., 2003, *A&A* 399, 43
- Blain, A., Smail, I., Ivison, R., 2002, *Phys. Rep.* 369, 111
- Boggess, N., Mather, J., Weiss, R. et al., 1992, *ApJ* 397, 420
- Bogun, S., 1995, "Vorbereitung der ISOPHOT Zufallsdurchmusterung", Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
- Bogun, S., Lemke, D., Klaas, U. et al., 1996, *A&A* 315, L71
- Bok, B.J., 1956, *AJ*, 61, 309

- Bonnell, I.A., Bate, M.R., Zinnecker, H., 1998, MNRAS 323, 785
- Boss, A.P. & Yorke, H.W., 1995, ApJ 439, 55
- Braine J., Combes F., 1992, A&A 264, 433
- Brand, J. & Blitz, L., 1993, A&A 275, 67
- Brand, J., Cesaroni, R., Caselli, P. et al., 1994, A&AS 102, 541
- Brand, J., Cesaroni, R., Palla, F., Molinari, S., 2001, A&A 370, 230
- Brar, R. S., Irwin, J.A., Saikia, D. J., 2003, MNRAS 340, 269
- Bronfman, L., Nyman, L.-Å. & May, J., 1996, A&AS 115, 81
- Brunt C.M., Kerton C.R., Pomerleau, C., 2003, ApJS 144, 47
- Bruzual, G.A. & Charlot, S., 1995, Starburst Template Library in IRAF-STSDAS
- Calzetti, D., 1997, AJ 113, 162
- Cambrésy, L., Epchstein, N., Copet, E. et al., 1997, A&A 324, L5
- Cambrésy, L., Beichman, C.A., Jarrett, T.H. et al., 2002, ApJ 123, 2559
- Cameron, R.M., 1976, Sky & Telescope 52, 327
- Casoli, F., Dupraz, C., Gerin, M. et al., 1986, A&A 169, 281
- Cao, Y., Tereby, S., Prince, T.A., Beichman, C.A., 1997, ApJS 111, 387
- Carey, S.J., Clark, F.O., Egan, M., 1998, ApJ 508, 721
- Carey, S.J., Feldman, P. A., Redman, R. O., 2000, ApJ 543, 157
- Carpenter, J.M., Snell, R.L., Schloerb, F.P., 1993, ApJ 407, 657
- Carpenter, J.M., 2000, AJ 120, 3139
- Cesaroni, R., Felli, M., Testi, L., 1997, A&A 325, 725
- Chapman, S.C., Smail, I., Ivison, R.J. et al., 2002, ApJ 573, 66
- Chini, R., Krügel, E., Lemke, R. & Ward-Thompson, D., 1995, A&A 295, 317
- Chini, R., Krügel, E., Wargau, W., 1987, A&A 181, 378
- Churchwell, E., Walmsley, C.M. & Cesaroni, R., 1990, A&AS 83, 119
- Churchwell, E., 2002, ARA&A 40, 27
- Cohen, M. & Kuhl, L.V., 1979, ApJS 41, 743
- Comoretto, G., Palagi, F., Cesaroni, R. et al., 1990, A&AS 84, 179
- Condon, J.J., 1992, ARA&A 30, 575
- Condon, J.J., Helou, G., Sanders, D. & Soifer, B., 1996, ApJS 103, 81
- Condon, J.J., Yin, Q.F., Thuan, T.X. et al., 1998, ApJ 116, 2682
- Cutri, R. M., Skrutskie, M.F., Van Dyk, S. et al., 2000, Explanatory Supplement to the 2MASS Second Incremental Data Release

- Dame, T.M. & Thaddeus, P., 1985, *ApJ* 297, 751
- Danby, G., Flower, D., Valiron, P. et al., 1988, *MNRAS* 235, 229
- de Jong, T., Clegg, P.E., Soifer, B.T. et al., 1984, *ApJL* 278, 67
- Dent, W.R.F., Matthews, H.E., Ward-Thompson, D., 1998, *MNRAS*, 301, 1049
- Désert, F.-X., Boulanger, F., Puget, J.L., 1990, *A&A* 237, 215
- Devereux, N.A. & Young, J.S., 1990, *ApJ* 359, 42
- Devereux, N.A. & Young, J.S., 1993, *AJ* 106, 948
- Dickman, R.L., 1978, *AJ*, 83, 363
- Dierickx, B., Cos, S., Vermeiren, J. et al., 1989, *Proc. SPIE* 1157, 24
- Dole, H., Gispert, R., Lagache, G. et al., 2000, in *Proc. "ISO Surveys of a Dusty Universe"* eds. Lemke D., Stickel, M. & Wilke, K., *Lecture Notes in Physics* 548, 54
- Downes, D. & Solomon, P.M., 1998, *ApJ* 507, 615
- Downes, D., Neri, R., Greve, A. et al., 1999, *A&A* 347, 809
- Dunlop, J.S., McLure, R.J., Yamada, T. et al., 2002, *astro-ph/0205480*
- Dunne, L. & Eales, S.A., Edmunds, M. et al., 2000, *MNRAS* 315, 115
- Dunne, L. & Eales, S.A., 2001, *MNRAS* 327, 697
- Egan, M.P., Shipman, R.F., Price, S.D., 1998, *ApJ*, 494, L199
- Egan, M.P., Price, S.D., Soshir, M.M. et al. 1999, *Air Force Laboratory Technical report No. AFRL-VS-TR-1999-1522*
- Eales, S.A., Wynn-Williams, C.G., Duncan, W.D., 1989, *ApJ* 413, L97
- Eales, S., Lilly, S., Gear, W. et al. 1999, *ApJ*, 515, 518
- Edwards, S., Hartigan, P., Ghandour, L. et al., 1994, *AJ* 108, 1056
- Efstathiou, A. & Rowan-Robinson, M., 2003, *astro-ph/0304555*
- Evans, N. J. Shirley, Y.L., Mueller, K.E. et al, 2002, in *Proc. "Hot Star Workshop III: The earliest phases of massive star birth"*, ed. P.A. Crowther, *ASP Conference Series* 267, 17
- Fernandez-Soto, A., Lanzetta, K.M. & Yahil, A., 1999, *ApJ* 513, 34
- Fioc, M. & Rocca-Volmerange, B., 1999, *astro-ph* 9904294
- Finkenzeller, U., 1985, *A&A* 151, 340
- Fisher, K.B., Huchra, J.P, Strauss, M.A. et al., 1995, *ApJS* 100 69
- Fitt, A.J., Alexander, P., Cox, M.J., 1988, *MNRAS* 233, 907
- Fixsen, D.J. & Dwek, E., 2002, *ApJ* 578, 1009
- Fruchter, A.S. & Hook, R.N., 2002, *PASP* 114, 144
- Gabriel, C., Acosta-Pulido, J., Heinrichsen, I. et al., 1997, in *Proc. "Astronomical Data Analysis Software and Systems VI"*, eds. G. Hunt & H. Payne, *ASP Conference Series*, Vol. 125, 108

- Garay, G. & Lizano, S., 1999, PASP 111, 1049
- Genzel, R., Lutz, D., Sturm, E., et al., 1998, ApJ 498, 579
- Gordon, K.D., Calzetti, D., Witt, A. N., 1997, ApJ 487, 625
- Gray, D.F., 1976, "The observation and analysis of stellar photospheres", Wiley, New York
- Griffin, M.J. & Orton, G.S., 1993, Icarus 105, 537
- Haas, M., Lemke, D., Stickel, M. et al., 1998, A&A 338, L33
- Haas, M., Klaas, U., Bianchi, S., 2002, A&A 385, L23
- Hamann, F. & Persson, S.E., 1992, ApJS 82, 285
- Harju, J., Walmsley, C.M., Wouterloot, J.G.A., 1993, A&AS 98, 51
- Hartmann, L., Kenyon, S., Calvet, N., 1993, ApJ 407, 219
- Hatchell, J., Fuller, G.A., Millar, T.J. et al., 2000, A&A 357, 637
- Helou G., Beichman C.A., 1990, in Proc. "From Ground-Based to Space-Borne Sub-mm Astronomy", Proc. of the 29th Liège International Astrophysical Coll., ESA Publ., 117
- Helou, G., 1986, ApJL 311, L33
- Henkel, C. & Wiklind, T., 1997, Space Science Reviews 81, 1
- Henning, Th., Lapinov, A., Schreyer, K. et al., 2000, A&A 364, 613
- Herbig, G.H., 1960, ApJS 4, 337
- Herbst, W. & Sawyer, D.L., 1981, ApJ, 243, 935
- Heyer, M. H., Brunt, C., Snell, R.L. et al., 1998, ApJS 115, 241
- Hildebrand, R., 1983, QJRAS 24, 267
- Hillenbrand, L.A., Strom, S.E., Vrba, F.J. et al., 1992, ApJ 397, 613
- Hippelein, H., Haas, M., Tuffs, R.J. et al., 2003, astro/ph 0306558
- Ho, P.T.P. & Townes, C.H., 1983, ARA&A 21, 239
- Hogg, D.W., Neugebauer, G., Cohen, J.G. et al., 2000, AJ 119, 1519
- Holland, W. S., Robson, E.I., Gear, W.K. et al., 1999, MNRAS, 303, 659
- Horne, K., 1986, PASP 98, 609
- Hotzel, S., Harju, J., Lemke, D. et al., 2001, A&A 372, 302
- Hotzel, S., 2001, "Strukturen im kalten Staub der Milchstraße", Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
- Huchtmeier, W. K., Richter, O.-G., 1989, "A General Catalog of HI Observations of Galaxies. The Reference Catalog", Springer-Verlag Berlin
- Hughes, D.H., Serjeant, S., Dunlop, J. et al., 1998, Nat 394, 241
- Hunter, T.R., Churchwell, E., Watson, C. et al., 2000, AJ 119, 2711

- Jenness, T. & Lightwood, J.F., 1998 in Proc. "Astronomical Data Analysis Software and Systems VIII", ASP Conference Series 145, 216
- Juvela, M., Mattila, K., Lehtinen, K. et al., 2002, A&A, 382, 583
- Kajisawa et al., 2003, in Vorbereitung
- Keel, W., 1991, PASP, 103, 723
- Kelsall, T., Weiland, J.L., Franz, B.A. et al., 1998, ApJ 508, 44
- Kennicutt, R., 1998, ARA&A 36, 189
- Kessler, M., Steinz, J., Anderegg, M. et al., 1996, A&A 315,
- Kinney, A.L., Calzetti, D., Bohlin, R.C. et al., 1996, ApJ 467, 38
- Klaas, U., & Elsässer, H., 1993, A&AS 99, 71
- Klaas, U., Krüger, H., Heinrichsen, I. et al., 1994, ISOPHOT Observer's Manual
- Klaas, U., Haas, M., Müller, S.A.H. et al., 2001, A&A 379, 823
- Knapp, G.R., 1999, in Proc. "Star Formation in Early-Type Galaxies", eds. P. Carral & J. Cepa, ASP Conference Series 163, 119
- Kreysa, E., Gmünd, H.-P., Gromke, J. et al, 1998, Proc. SPIE, 3357, 319
- Krügel, E., Siebenmorgen, R., Zota, V., Chini, R., 1998, A&A 331, L9
- Kurtz, S., Cesaroni, R., Churchwell, E. et al., 2000, in Protostars and Planets IV, ed. V. Mannings, A.P. Boss & S.S. Russell (Tucson: Univ. of Arizona Press), 299
- Lada, C.J. Adams, F.C., 1992, ApJ 393, 278
- Lagache, G., Abergel, A., Boulanger, F., Puget, J.-L., 1998, A&A 333, 709
- Langston, G., Connor, S., Heflin, M. et al., 1990, ApJ 353, 34
- Lee, Y., Snell, R. L., & Dickman, R. L., 1996, ApJ, 472, 275
- Lee, Y., Stark, A.A., Kim, H.G., Moon, D.-S., 2001, ApJS 136, 137
- Leinert, Ch., Haas, M., Ábrahám, P. et al., 2001, A&A 377, 1098
- Lemke, D., 1976, "Das Ballonteleskop THISBE – Aufbau und Beobachtungsprogramme", Habilitationsschrift, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
- Lemke, D., Lützwow-Wentzky, P., Fricke, W., Bollinger, W., 1993, Cryogenics 33, 395
- Lemke, D., Klaas, U., Abolins, J. et al., 1996, A&A 315, L64
- Lis, D. C., Serabyn, E., Zylka, R., Li, Y., 2001, ApJ 550, 761
- Liljeström, T., 1991, A&A, 244, 483
- Lisenfeld, U., Isaak, K.G. & Hills, R., 2000, MNRAS, 312, 433
- Low, F.J. et al., 1984, ApJ 278, L19
- Lucy, L.B., 1974, AJ 79, 745
- McCaughrean, M.J., & Stauffer, J.R., 1994, AJ, 108, 1382

- McKee, C.F. & Tan, J.C., 2002, *Nature* 416, 59
- Meyer, M.R., Calvet, R., Hillenbrand, L.A., 1997, *AJ* 114, 288
- Mezger, P.G., Mathis, J.S. & Panagia, N., 1982, *A&A* 105, 372
- Miroshnichenko, A., Ivezić, Z. & Elitzur, M., 1997, *ApJ* 475, L41
- Miroshnichenko, A., Ivezić, Z., Vinković, D. et al., 1999, *ApJ* 520, 115
- Molinari, S., Testi, L., Brand, J., et al., 1998, *ApJ* 505, L39
- Molinari, S., Brand, J., Cesaroni, R., et al., 1996, *A&A* 308, 573
- Molinari, S., Brand, J., Cesaroni, R., et al., 2000, *A&A* 355, 617
- Möllenhoff, C., Hummel, E., Bender, R., 1992, *A&A* 255, 36
- Monet, D., 1996, *BAAS*, 28, 905
- Moorwood, A., 1996, *Sp. Sci. Rev.* 77, 303
- Moran, E., Halpern, J.P. & Helfand, D.J., 1996, *ApJS* 106, 341
- Moshir, M., Kopman, G., Conrow, T. et al. 1992, "Explanatory Supplement to the IRAS Faint Source Survey, Version 2", JPL D-10015 8/92 (Pasadena: JPL)
- Müller, T.G. & Langerros, J., 1998, *A&A* 338, 340
- Müller, T.G., Hotzel, S., Stichel, M., 2002, *A&A* 389, 665
- Muxlow, T.W.B., Wilkinson, P.N., Richards, A.M.S. et al., 1999, *NewAR* 43, 623
- Myers, P.C., Benson, P.J., 1983, *ApJ* 266, 309
- Natta, A., Grinin, V.P. & Mannings, V., 2000, in *Protostars and Planets IV*, ed. V. Mannings, A.P. Boss & S.S. Russell (Tucson: Univ. of Arizona Press), 559
- Natta, A., Prusti, T., Neri, R. et al., 2001, *A&A* 371, 186
- Neininger, N., Guelin, M., Garcia-Burillo, S., 1996, *A&A* 310, 725
- Neugebauer, G., Habing, H.J., van Duinen, R. et al., 1984, *ApJ* 278, L1
- Odenwald, S. & Schwartz, P., 1993, *ApJ* 405, 706
- Ossenkopf, V. & Henning, Th., 1994, *A&A* 291, 943
- Paige, C.C. & Sanders, M.A., 1982, *ACM Trans. Math. Software* 8, 43
- Paley, E.S., Low, F.J., McGraw, J., 1991, *ApJ* 376, 335
- Palla, F., Brand, J., Comoretto, G. et al., 1991, *A&A* 246, 249
- Palla, F. & Stahler, S., 1993, *ApJ* 418, 414
- Palla, F., Stahler, S. W., 1999, *ApJ* 525, 772
- Paturel, G., 1989, *A&AS*, 80, 299
- Peréz-García, A.M., Rodríguez Espinosa, J.M. & Santolaya Rey, A.E., 1998, *ApJ* 500, 685
- Popescu, C.C., Misiriotis, A., Kylafis, N.D. et al., 1990, *A&A* 362, 138

- Popescu, C.C., Tuffs, R.J., Völk, H.J. et al., 2002, ApJ 567, 221
- Price, S.D. et al. 2001, AJ 121, 2819
- Prusti, T., Natta, A., Palla, F., 1994, A&A 292, 593
- Pudritz, R.E., 2002, Science 295, 68
- Reach, W.T., Heiles, C. & Koo, B.-C., 1993, ApJ 412, 127
- Reach, W.T., Dwek, E., Fixsen, D.J. et al., 1995, ApJ 451, 188
- Reach, W.T., 2000, "SIRTF Background Estimation", Technical Report, IPAC, Pasadena
- Rieke, G.H. & Lebofsky, M.J., 1979, ARA&A 17, 477
- Rieke, G. H.& Lebofsky, M. J., Thompson, R., 1980, ApJ 238, 24
- Rieke, G.H. & Lebofsky, M.J., 1985, ApJ 288, 618
- Robberto, M. & Herbst, T.M., 1998, Proc. SPIE 3354, 711
- Robin, A., Creeze, M., 1986, A&A, 157, 71
- Rohlfs, K. & Wilson, T., 2000, "Tools of Radio Astronomy", 3. Auflage, Springer Verlag Berlin, p. 196
- Rowan-Robinson, M. et al., 1991, Nature 351, 719
- Rowan-Robinson et al., 1990, MNRAS, 247 1
- Rowan-Robinson et al., 1997, MNRAS 289, 490
- Sahu, D.K., Pandey, S.K. & Kembhavi, A., 1998, A&A 333, 803
- Salpeter, E.E., 1955, ApJ 121, 161
- Sanders, D. & Mirabel, I, 1996, ARA&A 34, 749
- Saunders, W., Sutherland, W.J., Maddox, S. et al., 2000, MNRAS 317, 55
- Savage, B.D. & Mathis, J.S., 1979, ARA&A, 17, 73
- Schlegel, D.J., Finkbeiner, D.P. & Davis, M., 1998, ApJ 500, 525
- Schreyer, K., Henning, Th., Kömpe, C., Harjunpää, P., 1996, A&A 306, 267
- Schulz, B., Huth, S., Laureijs, R.J. et al., 2002, A&A 281, 1110
- Serjeant, S. et al., 2003, eingereicht bei MNRAS
- Shepherd, D. S., Yu, K. C., Bally, J. et al, 2000, ApJ 535, 833
- Shu, F., Adams, F., Lizano, S., 1987, ARA&A 25, 23
- Siebenmorgen, R., Krügel, E., Chini, R., 1999, A&A, 351, 495
- Sridharan, T.K., Beuther, H., Schilke, P. et al., 2002, ApJ 566, 931
- Smyth, M., 1986, in "Astronomical Methods & Data Processing", Vorlesungsskript Universität Edinburgh
- Sodroski, T. J., Bennett, C., Boggess, N., 1994 ApJ 428, 638

- Sodroski, T. J., Odegard, N., Arendt, R. G. et al., 1997, *ApJ* 480, 173
- Soifer, B., Rowan-Robinson, M., Houck, J., 1984, *ApJ* 278, 71
- Solomon, P.M., Downes, D., Radford, S.J.E. et al. 1997, *ApJ*, 478, 144
- Stetson, P.B., 1987, *PASP* 99, 191
- Stickel, M., Lemke, D., Bogun, S. et al., 1998a, *Proc. SPIE* 3349, 115
- Stickel, M., Bogun, S., Lemke, D. et al., 1998b, *A&A* 336, 116
- Stickel, M., Lemke, D., Klaas, U. et al., 2000, *A&A* 359, 865
- Stickel, M., Lemke, D., Klass, U. et al., 2002, *Proc. SPIE* 4847, 135
- Stickel, M., Lemke, D., Klass, U. et al, 2003, *A&A*, in Vorbereitung
- Testi, L., Palla, F., Natta, A., 1999, *A&A* 342, 515
- Teysier, D., Hennebelle, P. & Perault, M., 2002, *A&A* 382, 624
- Thé, P.S., de Winter, D., Pérez, M.R., 1994, *A&AS* 104, 315
- Tresse, L. & Maddox, S.J., 1998, *ApJ* 495, 691
- Tuffs, R.J., Lemke, D., Xu, C. et al., 1996, *A&* 315, L149
- Tuffs, R. et al., 2002, *ApJS* 139, 37
- Ungerechts, H., Umbanhowar, P., Thaddeus, P., 2000, *ApJ* 537, 221
- Veilleux, S. & Osterbrock, D.E., 1987, *ApJS*, 63, 295
- Veilleux, S., Kim, D.-C. & Sanders, D. B., 1999, *ApJ* 522, 113
- Walmsley, C.M., Ungerechts, H., 1983, *A&A* 122, 164
- Ward-Thompson, D., 2002, *Science* 295, 76
- Ward-Thompson, D., André, P. & Kirk, J. M., 2002, *MNRAS*, 329, 257
- Weinberger, R., Gajdosik, M. & Zanin, C., 1999, *A&AS* 137, 293
- Whittet, D.C.B., 1987, *QJRAS* 28, 303
- Wilking, B. A., Blackwell, J. H., Mundy, L. G., Howe, J. E., 1989, *ApJ* 345, 257
- Wiklind, T., 2003, *ApJ* 588, 736
- Wolf, J., Gabriel, C., Grözinger, U. et al. 1994, *Opt. Eng.* 33, 26
- Wood, D.O.S., Churchwell, E., 1989, *ApJ* 340, 265
- Wouterloot, J.G.A., Brand, J., 1989, *A&AS*, 80, 149
- Xu, C., Lisenfeld, U. & Völk, H.J., 1994, *A&A* 285, 19
- Yang, J., Jiang, Z., Wang, M. et al., 2002, *ApJS* 141, 157
- Yun, S.M., Reddy, N.A. & Condon, J.J., 2001, *ApJ* 554, 803

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle allen danken, die zur Entstehung dieser Arbeit wesentlich beigetragen haben:

Herrn Prof. Dr. Dietrich Lemke für die Vergabe des interessanten und vielseitigen Themas, sowie die hervorragende Betreuung.

Herrn Prof. Dr. Immo Appenzeller für die freundliche Bereitschaft zur Begutachtung dieser Arbeit.

Der Wernher von Braun-Stiftung zur Förderung der Weltraumwissenschaften e. V. für die finanzielle Unterstützung im Rahmen eines Promotionsstipendiums.

Den Direktoren des Max-Planck-Instituts für Astronomie, Herrn Prof. Dr. Immo Appenzeller, Herrn Prof. Dr. Hans-Walter Rix und Herrn Prof. Dr. Thomas Henning für die Möglichkeit, die Doktorarbeit am Institut durchführen zu können und für die Finanzierung von Konferenzteilnahmen und Beobachtungsaufenthalten.

Herrn Dr. Ulrich Klaas, der sich viel Zeit für die Betreuung der Doktorarbeit nahm, für die intensive Zusammenarbeit, die Durchsicht der Dissertation sowie die schöne Arbeitsatmosphäre.

Allen Organisationen und Observatorien (IRAM, ESO, DSAZ, MPIfR, JCMT, UKIRT, VLA), die Nachfolgebeobachtungen im Rahmen der Doktorarbeit ermöglichten, sowie allen Teleskopteams, die zum Gelingen dieser Messungen beigetragen haben.

Den Herren Prof. Michael Grewing, Dr. Roland Gredel, Dr. Ulrich Thiele und Dr. Clemens Thum für die zusätzliche Vergabe von Direktorenzeit.

Herrn Dr. Viktor Tóth und Herrn Dr. Henrik Beuther, deren Mitarbeit und Erfahrung eine optimale Ausnutzung der Beobachtungszeit bei den Ammoniak-Messungen am 100m-Teleskop in Effelsberg erlaubte.

Herrn Dr. Manfred Stickel für die Möglichkeit, auf seine Datenbank kompakter Quellen der Zufallsdurchmusterung zugreifen zu können sowie für die Durchsicht der Arbeit.

Herrn Dr. Youngung Lee und Herrn Dr. Roland Vavrek für die Bereitstellung von Daten der Bell ¹³CO Durchmusterung und die Mithilfe bei deren Auswertung.

Den Herren Prof. Dr. Steven Beckwith, Dr. Sebastiano Ligori und Dr. Massimo Robberto für die Unterstützung bei den UKIRT-Beobachtungen mit der MAX-Kamera.

Frau Dr. Ute Lisenfeld für die Mitarbeit bei Messungen am IRAM 30m-Teleskop.

Frau Barbara Becker, Herrn Stephan Birkmann und Herrn Meinrad Ege für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Den Kollegen in Heidelberg, die mir bei verschiedenen Fragen weiterhalfen, insbesondere Prof. Dr. Josef Fried, Dr. Martin Haas, Dr. Hans Hippelein, Dr. Stephan Hotzel, Dr. Karsten Wilke.

Schließlich meiner lieben Freundin Christine Becker für ihre große Unterstützung während aller Phasen der Doktorarbeit und ohne die die Dissertation in ihrer vorliegenden Form nicht möglich gewesen wäre.