

Université de Paris XI

THÈSE

présentée
pour obtenir

Le titre de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS XI
Spécialité : ASTROPHYSIQUE ET TECHNIQUES SPATIALES

par

Olivier LAURENT

ÉTUDE DES GALAXIES À FLAMBÉES D'ÉTOILES ET À NOYAU ACTIF DANS L'INFRAROUGE MOYEN AVEC ISOCAM

Soutenue le 3 décembre 1999 devant le jury composé de :

Mme	B. ROCCA-VOLMERANGE	Présidente
M.	D. ROUAN	Rapporteur
M.	D.B. SANDERS	Rapporteur
Mme	F. CASOLI	Examinatrice
M.	I.F. MIRABEL	Directeur de Thèse
M.	J. LEQUEUX	Directeur de Thèse

Université de Paris XI

THÈSE

présentée
pour obtenir

Le titre de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS XI
Spécialité : ASTROPHYSIQUE ET TECHNIQUES SPATIALES

par

Olivier LAURENT

ÉTUDE DES GALAXIES À FLAMBÉES D'ÉTOILES ET À NOYAU ACTIF DANS L'INFRAROUGE MOYEN AVEC ISOCAM

Soutenue le 3 décembre 1999 devant le jury composé de :

Mme	B. ROCCA-VOLMERANGE	Présidente
M.	D. ROUAN	Rapporteur
M.	D.B. SANDERS	Rapporteur
Mme	F. CASOLI	Examinatrice
M.	I.F. MIRABEL	Directeur de Thèse
M.	J. LEQUEUX	Directeur de Thèse

REMERCIEMENTS

C'est avec grand plaisir que je remercie mon directeur de thèse Félix Mirabel pour la confiance qu'il m'a accordée et pour m'avoir apporté son soutien et son expérience dans les différentes activités liées à la recherche. Je tiens également à remercier chaleureusement Vassilis Charmandaris pour son aide constante tout au long de ma thèse. Je dois énormément à Pascal Gallais qui a été responsable de la programmation et du suivi des observations ISOCAM utilisées durant ma thèse. Je remercie vivement Suzanne Madden pour ses conseils avisés et son aide précieuse dans la pratique de l'anglais.

Ces trois années passées au Service d'Astrophysique ont été pour moi d'une grande richesse scientifique et humaine. Je remercie le chef du Service d'Astrophysique Laurent Vigroux pour m'avoir accueilli au sein du groupe et également tous les membres ou ex-membres de l'équipe ISOCAM, Hervé Aussel, Olivier Boulade, Pierre Chaniel, Arnaud Claret, Alessandra Contursi, Thomas Douvion, Pierre-Alain Duc, David Elbaz, Dario Fadda, Hector Flores, Yaël Fuchs, René Gastaud, Emeric Le Floch, Koryo Okumura, Denis Reynaud, Hélène Roussel, Marc Sauvage, Natascha Schreiber, Jean-Luc Starck, Dan Tran, Andreas Vogler. Mes remerciements vont également à toutes les personnes ayant participé à l'élaboration du projet ISOCAM et à la construction de l'instrument et plus particulièrement à Catherine Cesarsky.

Je remercie toutes les personnes qui m'ont apporté leur soutien et plus généralement tous les membres du service d'Astrophysique de Saclay. Une pensée particulière va à Françoise Gaulier pour sa patience et son aide précieuse concernant le réseau informatique depuis mon stage de DEA en 1996 jusqu'à maintenant.

Je remercie Brigitte Rocca-Volmerange d'avoir accepté d'être la présidente de mon jury de thèse. Un grand merci également à mes deux rapporteurs Dave Sanders et Daniel Rouan pour l'attention qu'ils ont apportée à mon travail. Merci à Fabienne Casoli pour l'accueil qu'elle a fait à mon manuscrit en tant qu'examinatrice. Merci à James Lequeux pour avoir été responsable de ma thèse auprès de l'université.

Le travail effectué durant ces trois années doit également beaucoup au soutien continu de la part de ma mère et de mon amie Khamchou.

RÉSUMÉ

Cette thèse est consacrée à l'étude des galaxies à noyau actif et à sursauts de formation d'étoiles dans l'infrarouge moyen entre 3 et $16\mu\text{m}$ avec l'instrument ISOCAM.

Dans la première partie, je commence par rappeler les résultats les plus importants obtenus dans l'infrarouge avant la mise en service du satellite ISO. Je présente ensuite un résumé des principales propriétés de l'émission infrarouge observées dans les régions Galactiques et les galaxies normales.

Cette partie introductive me permet ensuite d'aborder dans la deuxième section l'étude des régions à flambées d'étoiles et des noyaux actifs de galaxies. L'observation de certains prototypes de galaxies tels que NGC 1068 et M 82 me conduit à définir trois composantes spectrales. D'une part, les régions de formation d'étoiles se caractérisent par (1) des bandes infrarouges à 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 et $12.7\mu\text{m}$ provenant de régions de photodissociation et par (2) un continuum à $15\mu\text{m}$ produit par les très petits grains dans les régions HII. Je montre d'autre part que les noyaux actifs se caractérisent par (3) un fort continuum se différenciant de celui des régions HII par une contribution importante entre 3 et $10\mu\text{m}$ émise par de la poussière chauffée jusqu'à des températures de l'ordre de 1000 K. Dans le cas particulier de la radio galaxie proche Centaurus A, sa cartographie à 7 et $15\mu\text{m}$ suggère l'existence d'une barre permettant ainsi d'alimenter l'objet compact supermassif au centre de la galaxie. Dans le cas des galaxies en interaction, je montre que les régions les plus actives en formation d'étoiles dominant l'émission à $15\mu\text{m}$ peuvent se produire en dehors des noyaux lors de la collision comme dans la galaxie Cartwheel et les Antennes. Les spectres infrarouges des galaxies ultralumineuses m'ont également permis de définir deux prototypes dominés soit par l'activité de formation d'étoiles dans le cas d'Arp 220 soit par le noyau actif dans le cas des Super-Antennes (IRAS 19254-7245).

Dans la troisième partie, je présente deux diagrammes de diagnostics basés sur les propriétés spectrales des trois composantes définies précédemment. Ce diagramme permet de séparer les régions dominées par les noyaux actifs de celles dominées par les flambées de formation d'étoiles. Je montre que le rapport ISOCAM classique $\text{LW3}(12-18\mu\text{m})/\text{LW2}(5-8.5\mu\text{m})$ ne permet pas de distinguer ces deux types de contribution. J'explique comment ce diagramme et ces critères de sélection évoluent en fonction du décalage spectral. Enfin, je montre comment on peut développer de nouveaux diagnostics basés sur des filtres de l'instrument IRAC installé à bord du prochain satellite infrarouge SIRTf.

Mots-clés : galaxies - formation d'étoiles - noyaux actifs de galaxies - infrarouge - poussières

ABSTRACT

This thesis is dedicated to the study of starburst galaxies and active galactic nuclei (AGNs) in the mid-infrared between 3 and $16\mu\text{m}$ with the ISOCAM instrument.

First, I begin to introduce the main results obtained in the infrared before the ISO mission. I summarize afterwards the mid-infrared emission properties observed in Galactic regions and normal galaxies.

In the second part, I present mid-infrared observations of galaxies harboring AGNs and starburst activity such as NGC 1068 et M 82. I decompose the emission into three components. The star forming regions are characterized by (1) the infrared bands at 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 and $12.7\mu\text{m}$ originating from the photodissociation regions and also by (2) a continuum at $15\mu\text{m}$ produced by the very small grains in HII regions. I show that AGNs have (3) strong continuum with an important contribution between 3 and $10\mu\text{m}$ coming from hot dust heated at high dust temperatures of the order of 1000 K. In the particular case of the nearby radio galaxy Centaurus A, the 7 and $15\mu\text{m}$ maps suggest the presence of a bar funneling the gas towards the supermassive compact object into the galactic centre. In interacting galaxies, I show that some extra-nuclear regions harboring starburst activity can dominate the emission at $15\mu\text{m}$ as in the Cartwheel and the Antennae galaxies. Using mid-infrared spectral features, I also define two prototypes of ultraluminous galaxies dominated either by starburst activity in the case of Arp 220 or by the AGN in the Super-Antennae galaxy (IRAS 19254-7245). In the third part, I present two diagnostic diagrams based on the spectral properties of the three components. This diagram can serve to distinguish active nuclei from starburst regions. I show that the classical filter ratio $\text{LW3}(12\text{-}18\mu\text{m})/\text{LW2}(5\text{-}8.5\mu\text{m})$ cannot be used to separate these two types of contribution. I explain how this diagram and the selection criteria evolve according to redshift. Finally, I show how we can develop new diagnostics using filters of the IRAC instrument on board the next infrared space observatory SIRTf.

Key words: galaxies - starburst - active galactic nuclei - infrared - dust

Table des matières

RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
 I Introduction générale	 1
1 Introduction	3
1.1 L'activité dans les galaxies vues par IRAS	3
1.2 Plan de thèse	9
 2 Les galaxies "normales" dans l'infrarouge	 11
2.1 Notre galaxie dans l'infrarouge	11
2.1.1 La poussière	12
2.1.2 Les étoiles	15
2.1.3 Le gaz	17
2.2 Les galaxies normales	17
2.2.1 Les galaxies elliptiques	17
2.2.2 Les galaxies spirales	20
 II Emission en infrarouge moyen des régions à sursauts de formation d'étoiles et des noyaux actifs	 25
 3 Les galaxies à flambées de formation d'étoiles	 27
3.1 Introduction	27
3.2 Deux prototypes: M 82 et NGC 253	27
3.2.1 M82: La galaxie starburst de l'hémisphère nord	28
3.2.2 NGC 253: La galaxie starburst de l'hémisphère sud	38
3.3 Une galaxie starburst extrême: II Zw 40	40
 4 Les galaxies avec un noyau actif	 45
4.1 Introduction	45
4.2 Le modèle standard des noyaux actifs de galaxies	46
4.3 Le prototype de Seyfert 2: NGC 1068	50
4.4 Le prototype de radio galaxie: CENTAURUS A	58
4.5 Article: "A barred spiral at the centre of the giant elliptical radio galaxy Centaurus A"	63

5	Les galaxies en interaction: starbursts et AGNs	71
5.1	Introduction	71
5.2	La galaxie "Les Antennes" (NGC 4038/39)	72
5.3	Les galaxies à anneaux	75
5.4	Les galaxies ultralumineuses	76
5.4.1	Le prototype de galaxie ultralumineuse: Arp 220	77
5.4.2	La galaxie "Les Super-Antennes" (IRAS 19254-7245)	79
5.4.3	Un système de galaxies en interaction: Arp 299	81
5.5	Article: "Dust in the wheel: The Cartwheel galaxy in the Mid-IR" . . .	91
III	Etude générale de l'émission infrarouge des galaxies	96
6	Classification des galaxies avec ISOCAM	99
6.1	Introduction	99
6.2	Les couleurs ISOCAM: LW2/LW3	100
6.3	Les spectres prototypes dans l'infrarouge moyen	102
6.4	Diagrammes de diagnostics avec ISOCAM.	104
6.4.1	Diagnostics séparant les PDRs des AGNs/régions HII	105
6.4.2	Diagnostics séparant les régions HII des AGNs/PDRs	111
6.4.3	Diagrammes de diagnostics à deux dimensions	113
6.4.4	Les limitations de la classification Starburst/AGN	121
6.5	Article: "Mid-infrared diagnostics to distinguish AGNs from starbursts" .	123
6.6	Conférence: "Spatial resolution bias in the mid-infrared Starburst/AGN classification"	139
7	Application sur les galaxies lointaines	143
7.1	Introduction	143
7.2	Diagrammes de diagnostics jusqu'à $z=1$	143
7.3	La contamination par les étoiles	146
7.4	Implications sur les observations avec SIRTf.	148
IV	Conclusion	149
8	Résultats	153
9	Publications	155
9.1	Articles à comité d'évaluation:	155
9.2	Articles en préparation:	155
9.3	Comptes rendus de présentations.	156
9.4	Comptes rendus de "posters".	156
10	Perspectives	159

V	Annexe	160
A	L'instrument ISOCAM	163
B	Réduction des données ISOCAM	167
B.1	Normalisation des données en ADU/Gain/Tint.	167
B.2	Soustraction du courant d'obscurité ("dark").	168
B.3	Correction des rayons cosmiques	168
B.4	Effets de mémoire	169
B.5	Correction du champ plat	171
B.6	Correction du "jitter"	171
B.7	Déconvolution spatiale	173
B.8	Déconvolution spectrale	178
C	Les galaxies de CAMACTIV.	183

Table des figures

1.1	Fonction de luminosité et SED des galaxies brillantes IRAS.	4
1.2	Diagramme couleur-couleur IRAS pour les galaxies normales.	5
1.3	Les galaxies NGC 4038/39, NGC 7252, IRAS 19254-7245, Arp 220. . . .	6
1.4	Diagrammes couleur-couleur IRAS pour les galaxies actives.	7
1.5	Rapport $L_{FIR}/M(H_2)$ en fonction de L_{FIR}	7
1.6	Classification spectrale en fonction de la luminosité en infrarouge. . . .	8
2.1	Décomposition spectrale de l'émission infrarouge.	13
2.2	Observations ISOCAM de M17.	14
2.3	Spectres en infrarouge moyen de régions HII et de PDRs.	15
2.4	Spectres stellaires en infrarouge moyen.	16
2.5	Contribution des poussières entourant les étoiles AGB.	16
2.6	Spectres SWS de M 17 et spectre LWS de NGC 7027.	17
2.7	Observations ISOCAM de NGC 4649.	18
2.8	Observations ISOCAM de NGC 5266.	19
2.9	La galaxie M 51 avec son compagnon NGC 5195.	20
2.10	Carte de couleur LW3(12-18 μm)/LW2(5-8.5 μm) de M 51.	21
2.11	Variation du rapport LW3(12-18 μm)/LW2(5-8.5 μm) dans M51.	22
2.12	Distribution du rapport LW3(12-18 μm)/LW2(5-8.5 μm) dans M 51. . .	23
2.13	Comparaison de l'émission infrarouge avec la carte H α et UV.	24
3.1	La galaxie M 82 en optique et en infrarouge moyen.	28
3.2	Décomposition spectrale en UIBs, raies et continuum.	29
3.3	Spectres ISOCAM des différentes régions de M 82.	30
3.4	Variations spectrales en infrarouge moyen dans M 82.	31
3.5	LW3(12-18 μm)/LW2(5-8.5 μm) en fonction des UIBs et du continuum. .	32
3.6	Distribution du rapport LW3(12-18 μm)/LW2(5-8.5 μm) dans M 82. . .	33
3.7	Pente du continuum des VSGs en fonction de LW3/LW2.	33
3.8	Méthode d'intégration des UIBs et des raies ioniques.	34
3.9	Spectre SWS de M 82 entre 2.5 et 45 μm	35
3.10	Variations relatives des UIBs dans M 82.	35
3.11	Loi d'extinction dans le domaine ISOCAM.	36
3.12	Les différentes lois d'extinction.	37
3.13	Carte de l'UIB(12.7 μm) avec la raie [NeII](12.8 μm) dans M 82.	37
3.14	Observations de M 82 avec les filtres SW entre 3 et 4 μm	38
3.15	La galaxie NGC 253 en optique et en infrarouge moyen.	39
3.16	Carte LW3(12-18 μm)/LW2(5-8.5 μm) de NGC 253.	39

3.17	Variabilité spectrale dans NGC 253.	40
3.18	Décomposition spectrale en UIBs+Continuum.	40
3.19	Spectre ISOCAM de II Zw 40.	41
3.20	Les régions de formation d'étoiles dans l'infrarouge moyen.	43
4.1	Modèle standard des noyaux actifs de galaxies.	47
4.2	Observation ISOCAM en mode CVF de NGC 1068.	51
4.3	Observations ISOCAM entre 3 et 4 μm de NGC 1068.	53
4.4	Cartes SCUBA(450-850 μm) et CO(1-0) de NGC 1068.	53
4.5	Spectre SWS de NGC 1068 entre 2.5 et 45 μm	54
4.6	Variation de la fraction AGN/Starburst entre 5 et 16 μm	55
4.7	Observations de NGC 1068 dans l'infrarouge moyen et proche.	56
4.8	Observations de NGC 6240 dans l'infrarouge moyen.	57
4.9	Spectre ISOPHOT-S du reste de supernova RCW 103.	58
4.10	Cen A aux grandes jusqu'aux plus petites échelles spatiales.	59
4.11	Observations en mode CVF de la région centrale de Cen A.	60
4.12	Les galaxies actives et leurs AGNs observés dans l'infrarouge moyen.	62
5.1	Les "Antennes" à 15 μm avec les spectres des trois régions dominantes.	73
5.2	Les "Antennes" en CO, en continuum à 20 cm, à 15 μm , en HI et en X.	73
5.3	Cartes des UIBs, raies et du continuum à 15 μm dans NGC 4038/39.	74
5.4	Formation des galaxies à anneaux (Lynds and Toomre, 1976).	75
5.5	Carte H α de Arp 10 avec les contours à 7 μm et 15 μm	76
5.6	Image du télescope spatial Hubble et spectre CVF de Arp 220.	78
5.7	Spectres de Arp 220 avec ISOCAM et ISOPHOT-S.	78
5.8	Distributions spectrales d'énergie des deux galaxies des "Super-Antennes".	79
5.9	Modèles de spectres pour les deux galaxies des "Super-Antennes".	80
5.10	Observations optique et infrarouge de Arp 299.	82
5.11	Image HST optique de NGC 3690 avec les contours en bandes J et L.	83
5.12	Image HST à 1.6 μm (NICMOS) avec les contours ISOCAM à 5-8.5 μm	83
5.13	Spectres ISOCAM des différentes régions de Arp 299.	85
5.14	Comparaison des spectres de Arp 299 avec des spectres prototypes.	86
5.15	Décomposition spectrale du spectre de la source B1.	87
5.16	Distributions spectrales d'énergie de IC 694(A) et NGC 3690(B+C).	88
6.1	Diagrammes couleur-couleur IRAS-ISOCAM.	100
6.2	Variation du rapport LW3/LW2 le long de la séquence d'interaction.	102
6.3	Les quatre principales sources d'émission en infrarouge.	103
6.4	Méthodes utilisées pour estimer les rapports UIBs/Continuum.	105
6.5	Applications des indicateurs UIB/Continuum.	106
6.6	Les indicateurs UIB/Continuum à partir des filtres larges LW.	108
6.7	Spectres ISOPHOT-S moyennés de galaxies ultralumineuses.	109
6.8	Diagramme UIB(7.7 μm)/Continuum(7.7 μm).	110
6.9	Le continuum à 14-15 μm comparé à l'émission à 5-8 μm	112
6.10	Diagrammes de diagnostics (AGN/HII/PDR).	113
6.11	Application du diagramme de diagnostics (AGN/HII/PDR).	114

6.12	Diagramme de diagnostics (AGN/HII/PDR) basé sur les filtres LW. . .	115
6.13	Diagnostics sur NGC 1068(AGN), M 17(HII), M 82 et NGC 7023(PDR). . .	115
6.14	Diagramme de diagnostics développé par Genzel et al. (1998).	117
6.15	Application du diagnostic UIB($7.7\mu\text{m}$)/Continuum($7.7\mu\text{m}$) sur Cen A. . .	118
6.16	Spectre ISO-SWS de M82 et de Circinus.	119
6.17	UIB/Continuum en fonction de Cont($5.9\mu\text{m}$)/Cont($60\mu\text{m}$) et L_{IR}	120
6.18	Effets de l'extinction sur le continuum de l'AGN.	122
7.1	Diagrammes de diagnostics (AGN/HII/PDR) pour différents redshifts. . .	144
7.2	Diagrammes de diagnostics (AGN/HII/PDR) pour différents redshifts. . .	145
7.3	Diagrammes de diagnostics (Étoile/HII/PDR) pour différents redshifts. . .	146
7.4	Diagrammes de diagnostics (Étoile/HII/PDR) pour différents redshifts. . .	147
7.5	Evolution du rapport AGN/Starburst avec SIRTf.	148
7.6	Diagramme de diagnostics pour l'instrument IRAC de SIRTf.	149
A.1	Capacités photométriques et spectroscopiques des instruments d'ISO. . .	163
A.2	Schéma optique d'ISOCAM.	164
B.1	Les différentes étapes de réduction des données ISOCAM.	167
B.2	Correction du "dark" sur la première "frame" du CVF de NGC 1068. . .	168
B.3	Extraction des pics d'intensité dus aux rayons cosmiques.	169
B.4	Effets de la correction de stabilisation.	170
B.5	Champ plat de calibration obtenu pour le filtre LW3.	171
B.6	Précision du pointage du satellite.	172
B.7	Effet du "jitter" sur la répartition du flux sur le détecteur.	172
B.8	Correction du "jitter".	173
B.9	Variation de la largeur des PSFs.	174
B.10	Illustration du mode microscan.	174
B.11	Déconvolution d'un modèle de source.	175
B.12	Déconvolution de IRAS 14348-1447.	176
B.13	Déconvolution de NGC 1068 à $7\mu\text{m}$ avec une PSF expérimentale. . . .	177
B.14	Profils selon l'axe Y du détecteur centrés sur le noyau de NGC 1068. . .	177
B.15	Conversion ADU en Jansky et transmission spectrale.	178
B.16	Déconvolution spectrale sur un modèle.	179
B.17	Méthodes de déconvolution spectrale sur le spectre du noyau de M 82. .	180
B.18	Trois exemples de déconvolution spectrale.	181

Liste des tableaux

3.1	Potentiers d'ionisation des raies observées entre 5 et 16 μm	41
5.1	Flux intégrés pour chaque galaxie de IRAS 19254-7245.	80
5.2	Photométrie du continuum et de l'UIB à 3.3 μm de Arp 299.	88
A.1	Propriétés des filtres ISOCAM.	165
A.2	Les différents champs de vue avec ISOCAM.	165
B.1	Caractéristiques du "jitter" pour NGC 1068.	172

Première partie

Introduction générale

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1 L'activité dans les galaxies vues par IRAS	3
1.2 Plan de thèse	9

1.1 L'activité dans les galaxies vues par IRAS

Les débuts de l'observation en infrarouge dans les années 70 ont permis de découvrir que les galaxies émettent une partie non négligeable de leur luminosité dans ce domaine de longueur d'onde ($1\text{-}1000\mu\text{m}$). La poussière présente dans les galaxies est en effet chauffée par le rayonnement interstellaire pour se refroidir ensuite en rayonnant dans l'infrarouge. Avant le lancement du satellite IRAS en 1983, la connaissance des propriétés des galaxies dans l'infrarouge était limitée à quelques objets proches tels que M82 ou NGC 1068 (voir Rieke and Lebofsky, 1979). L'avènement du satellite IRAS a permis d'étudier, grâce à sa meilleure sensibilité comparée aux télescopes basés au sol, plus de 20000 galaxies dans l'infrarouge moyen ($12, 25\mu\text{m}$) et lointain ($60, 100\mu\text{m}$). Ce satellite a permis de découvrir des galaxies non encore cataloguées jusqu'à une limite de complétude de l'ordre de 0.5 Jy^1 à $12, 25, 60\mu\text{m}$ et $\sim 1.5\text{ Jy}$ à $100\mu\text{m}$ en couvrant 95% du ciel (voir Soifer et al., 1987a). La majorité des galaxies observées sont de modestes émetteurs en infrarouge. Cependant, un des résultats principaux d'IRAS fut la découverte de centaines de galaxies lumineuses ($L_{IR}(8\text{-}1000\mu\text{m}) > 10^{11}L_{\odot}$) émettant l'essentielle de leur émission bolométrique dans l'infrarouge. Certaines d'entre elles, nommées galaxies infrarouges ultralumineuses, présentent des luminosités extrêmes avec $L_{IR}(8\text{-}1000\mu\text{m}) > 10^{12}L_{\odot}$ (voir Sanders and Mirabel, 1996).

Les galaxies lumineuses deviennent pour une luminosité identique, la population dominante parmi les objets extragalactiques dans l'univers local ($z < 0.3$, voir Fig. 1.1) devançant les galaxies à flambées d'étoiles, de Seyfert et même les quasars. Cependant, ces galaxies lumineuses restent relativement rares et ne représentent que 6 % de l'émission infrarouge totale pour $z < 0.3$.

1. $1\text{ Jy} = 10^{-26}\text{ W.m}^{-2}.\text{Hz}^{-1}$

Les distributions spectrales d'énergie² représentées sur la figure 1.1 permettent de noter la grande variabilité de l'émission infrarouge qui détermine complètement la luminosité bolométrique. On remarque que luminosité varie d'un facteur 3 dans l'optique alors qu'elle atteint un facteur mille dans l'infrarouge ce qui permet de mieux comprendre pourquoi il a fallu attendre les observations en infrarouge pour découvrir ces objets. Une fraction des galaxies montrant une SED plus plate appelées galaxies "chaudes" ("warm" en anglais) permet de sélectionner statistiquement celles contenant un noyau actif³ (de Grijp et al., 1985).

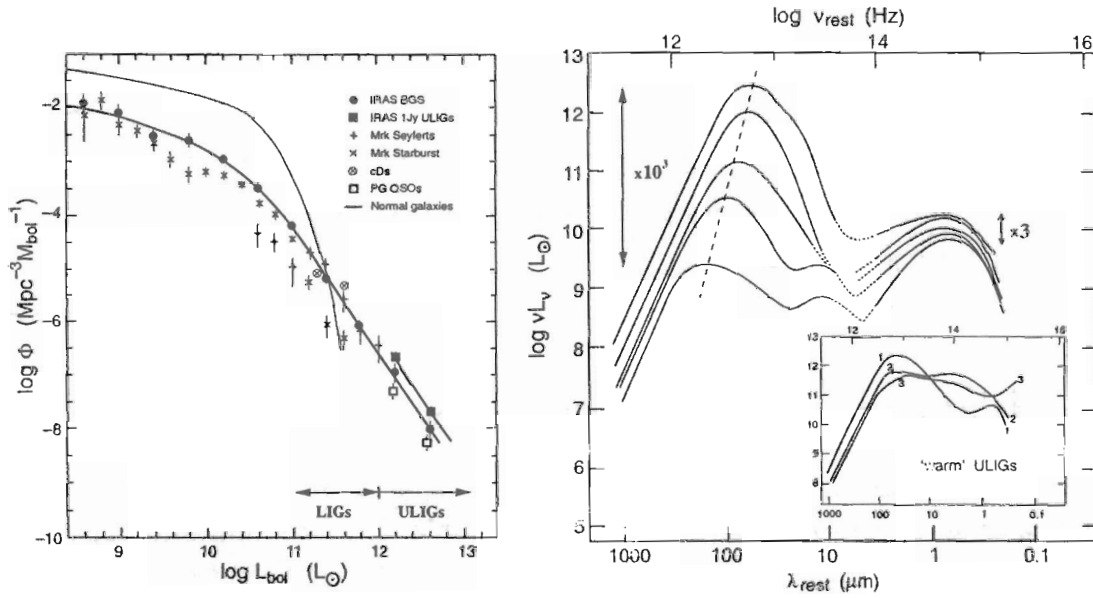


FIG. 1.1 – Fonction de luminosité et SED des galaxies brillantes IRAS (Sanders and Mirabel, 1996). Figure de gauche: fonction de luminosité des galaxies brillantes IRAS (BGS, trait épais) comparée aux galaxies normales (trait fin). Figure de droite: évolution des SEDs en fonction de la luminosité bolométrique. En dessous, on a représenté des spectres de galaxies "chaudes" caractérisés par un fort continuum en infrarouge moyen à $10\text{--}30\mu\text{m}$ ($f_{25}/f_{60} > 0.2$).

On observe aussi un déplacement du pic d'émission vers les courtes longueurs d'onde à mesure que la luminosité augmente, traçant ainsi une émission thermique plus chaude de la poussière. Cette tendance se traduit par une augmentation du rapport f_{60}/f_{100} et inversement par une diminution du rapport f_{12}/f_{25} (voir Fig. 1.2). Un modèle simple à deux composantes proposé par Helou (1986) permet de décomposer l'émission en une composante froide ($T \sim 15\text{--}20\text{K}$) provenant de régions diffuses ("cirrus") et en une composante chaude ($T \sim 60\text{K}$) produite par les régions de formation d'étoiles. En effet, l'infrarouge trace l'émission de la poussière chauffée par les étoiles dans les galaxies

2. "Spectral Energy Distribution" ou "SED" en anglais.

3. "Active Galactic Nuclei" ou "AGN" en anglais, terme utilisé par la suite. Le modèle classique d'AGN se compose d'un trou noir super-massif ($10^6\text{--}10^9 M_{\odot}$) entouré d'un disque accrétion au cœur des galaxies actives, voir le chapitre 4 pour plus de détails.

non actives (i.e. sans AGN). Le diagramme f_{60}/f_{100} en fonction de f_{12}/f_{25} permet de suivre l'évolution de l'émission infrarouge des cirrus jusqu'aux régions à sursauts de formation d'étoiles⁴. Pour certaines galaxies contenant un AGN, le fort rapport f_{25}/f_{60} qui les caractérise indique la présence d'une autre composante de poussières chaudes dont l'émission pique à $25\mu\text{m}$. Cette composante de poussières à une température de l'ordre de 200 K provient du tore de gaz et de poussières entourant l'objet compact au centre de la galaxie (Miley et al., 1984; Fadda et al., 1998).

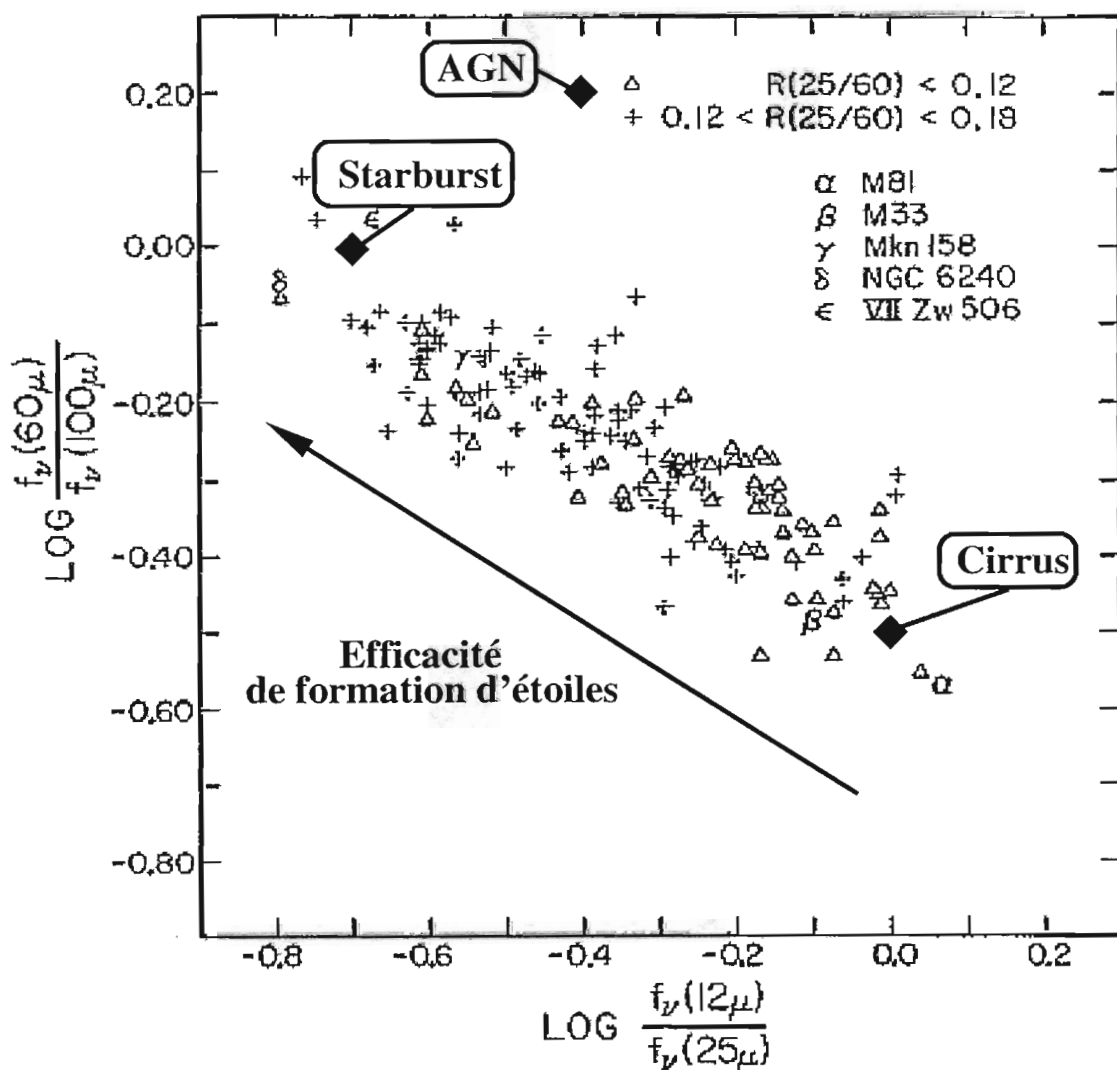


FIG. 1.2 – Diagramme couleur-couleur IRAS pour les galaxies normales (Helou, 1986). Quelques galaxies caractéristiques sont représentées individuellement. Les objets avec $f_{25}/f_{60} > 0.18$ n'ont pas été considérés car beaucoup d'entre eux sont dominés par un AGN (de Grijp et al., 1985). Les losanges remplis correspondent aux couleurs caractérisant les starbursts, les AGNs et les cirrus (Rowan-Robinson and Crawford, 1989).

4. "Starburst" en anglais, terme utilisé par la suite.

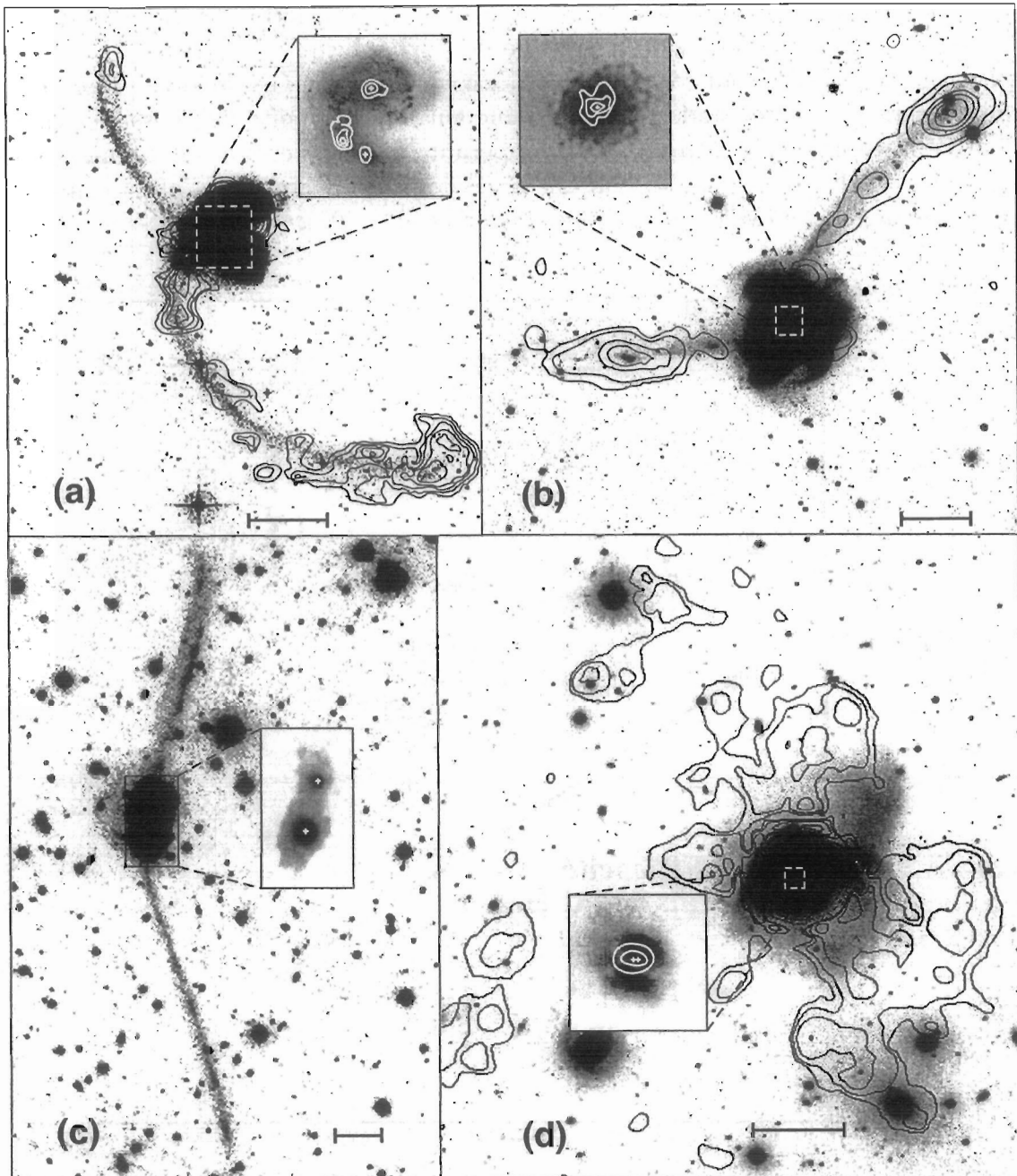


FIG. 1.3 – *Prototype de galaxies en interaction: (a) NGC 4038/39 (“The Antennae”), (b) NGC 7252 (“Atoms for Peace”), (c) IRAS 19254-7245 (“The Super Antennae”), (d) Arp 220. Le gaz atomique HI tracé par la raie à 21cm est en contours noirs superposés à des images optiques en bande R. Dans les parties centrales, on note la présence de gaz moléculaire représenté en contours blancs (CO(1→0)) sur des images en K. La barre représente 10 kpc (Sanders and Mirabel, 1996).*

Ainsi l’excès infrarouge observé dans les galaxies lumineuses par rapport aux galaxies normales est corrélé, au vu de la figure 1.1 à droite, avec la présence d’une composante de poussières relativement chaudes associées à des régions de formation d’étoiles ou à un

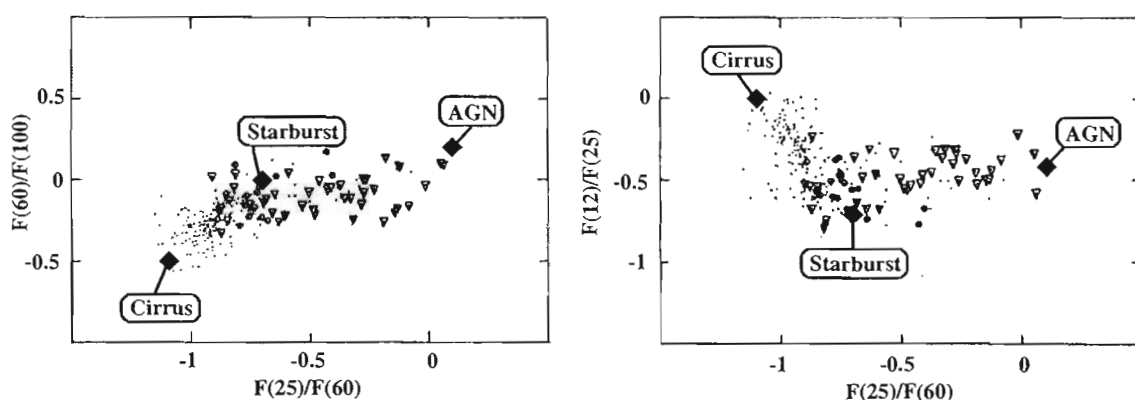


FIG. 1.4 – Diagrammes couleur-couleur IRAS mettant en évidence la sélection des galaxies chaudes contenant un AGN pour les grands rapports f_{25}/f_{60} (Rowan-Robinson and Crawford, 1989). Les triangles représentent les galaxies de Seyfert (possédant un AGN sélectionné en optique), les cercles sont pour les galaxies starbursts et les points pour les galaxies normales. Les losanges remplis correspondent aux couleurs caractérisant les starbursts, les AGNs et les cirrus présents dans les disques de galaxies.

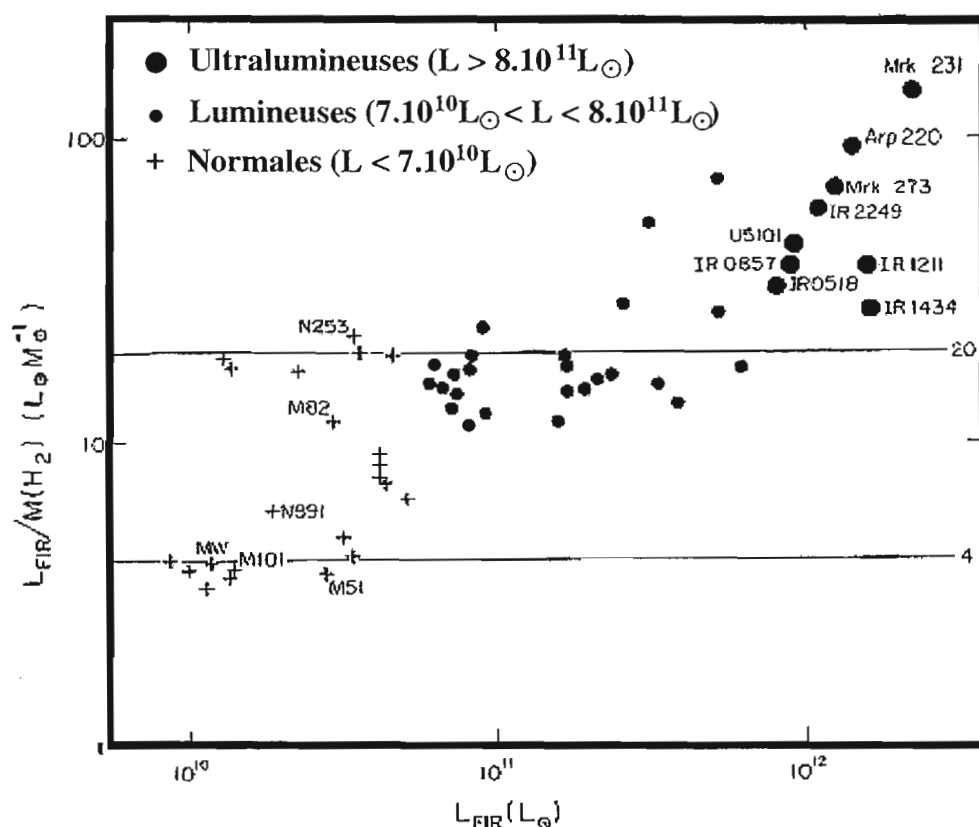


FIG. 1.5 – Rapport entre la luminosité totale IRAS en infrarouge lointain L_{FIR} et la masse de gaz moléculaire $M(H_2)$ en fonction de L_{FIR} (Sanders et al., 1988). Les traits horizontaux à $4 L_{\odot}/M_{\odot}$ et $20 L_{\odot}/M_{\odot}$ correspondent à la valeur moyenne trouvée respectivement dans les galaxies spirales (M51) et starbursts (M82, NGC 253).

AGN. Dans le cas extrême des galaxies ultralumineuses ($L_{IR}(8-1000\mu m) > 10^{12} L_{\odot}$), la luminosité est provoquée par de fortes interactions entre galaxies riches en gaz (queues de marées, présence de plusieurs galaxies à quelques kilo-parsecs de distance). En effet, lors d'interactions, le gaz moléculaire se concentre vers les régions centrales (voir Fig. 1.3) où des flambées de formation d'étoiles peuvent se produire tout en permettant également l'alimentation d'un AGN.

La luminosité des galaxies lumineuses infrarouges provient essentiellement de la poussière interstellaire chauffée par d'intenses "starbursts" (Carico et al., 1988). Cependant pour les galaxies ultralumineuses, qui sont presque toutes dans des phases d'interactions très avancées, la source d'énergie se partage entre l'activité "starburst" et celle reliée à un "AGN", l'ensemble étant alimenté par d'énormes concentrations de gaz moléculaire ($10^9 - 10^{10} M_{\odot}$) présentes dans les noyaux de ces galaxies (Sanders et al., 1988; Condon et al., 1991). De plus, l'efficacité de conversion du gaz via la formation d'étoiles ou l'AGN qui chauffent ensuite les poussières émettant dans l'infrarouge augmente considérablement avec la luminosité. On atteint des valeurs 5 à 40 fois supérieures à celle de notre galaxie (voir Fig. 1.5).

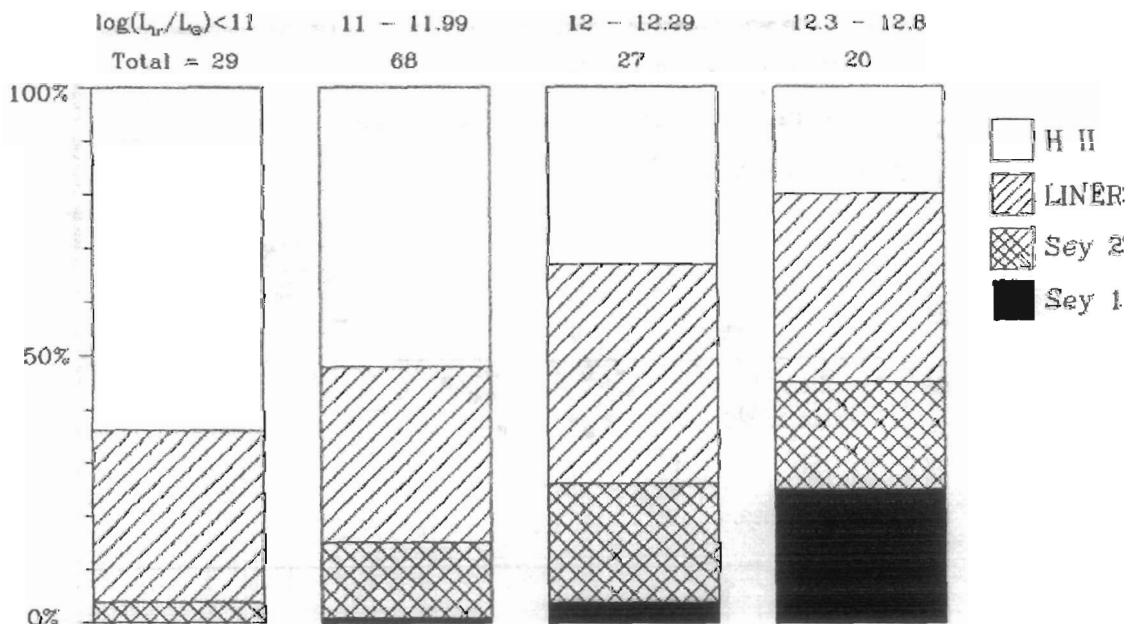


FIG. 1.6 – Distribution de la classification spectrale en fonction de la luminosité en infrarouge (Kim et al., 1998).

Bien que la formation d'étoiles semble être la source d'énergie la plus généralement évoquée pour expliquer le chauffage de la poussière, l'AGN reste un modèle plausible pour les galaxies les plus extrêmes en luminosité. Ceci est suggéré par le fait que la fraction des galaxies contenant un AGN identifié en optique augmente avec la luminosité infrarouge (voir Fig. 1.6).

Les grandes concentrations de gaz au centre des galaxies où se trouvent l'AGN et les starbursts nucléaires impliquent aussi de grandes quantités de poussières dans une région de quelques centaines de parsecs, produisant ainsi une très forte absorption. Les

classifications optiques sont donc limitées par l'extinction (Veilleux et al., 1995; de Grijp et al., 1995; Kim et al., 1998). Les longueurs d'ondes radio, bien que non obscurcies, ne permettent pas une classification définitive (Condon et al., 1991; Lonsdale et al., 1993; Smith et al., 1998a). L'infrarouge nous permet de nous affranchir en grande partie de l'extinction ($A_{15\mu m} \sim A_V/70$) tout en traçant la poussière en émission liée à l'activité starburst ou à l'AGN. Des observations au sol dans l'infrarouge moyen (Roche et al., 1991; Dudley and Wynn-Williams, 1997) et plus récemment dans l'espace avec le satellite ISO ("Infrared Space Observatory") (Lutz et al., 1998a; Genzel et al., 1998b) ont ainsi contribué considérablement à la connaissance des galaxies lumineuses en infrarouge. Dans le but d'améliorer notre compréhension des galaxies lumineuses infrarouges découvertes par IRAS, la caméra ISOCAM installée à bord du satellite ISO nous offre la possibilité d'observer ces objets avec une résolution spatiale et spectrale sans précédent entre 2 et $18\mu m$.

1.2 Plan de thèse

Ma thèse concerne l'étude de galaxies lumineuses infrarouges mises en évidence par IRAS et pour lesquelles j'ai disposé d'observations réalisées avec la caméra ISOCAM sur un échantillon de galaxies proches abritant des régions de flambées d'étoiles et/ou des AGNs.

J'exposerai dans un premier temps les différentes propriétés spectrales observées dans les prototypes de galaxies les plus proches pour identifier au mieux chaque composante galactique. Tout d'abord, je rappellerai les caractéristiques majeures de l'émission infrarouge observées dans les galaxies normales ce qui me permettra d'aborder ensuite l'étude des galaxies starbursts puis celle des noyaux actifs de galaxies. Cette approche nous permet de séparer chaque constituant en utilisant au mieux le pouvoir de résolution spatiale de la caméra. La connaissance des différentes propriétés spectrales rencontrées dans ces galaxies proches est ensuite utilisée pour définir des critères de sélection applicables à l'ensemble des galaxies de notre échantillon. Je présenterai un diagramme de diagnostics permettant d'identifier et d'estimer la fraction de l'émission associée soit à l'activité de formation d'étoiles soit au noyau actif. J'ai ensuite utilisé la connaissance des propriétés spectrales des galaxies proches pour déduire des diagnostics s'appliquant aux galaxies à plus grand redshift observées dans les champs profonds ISOCAM. Je conclus en exposant les principaux résultats de ma thèse ainsi que les développements futurs que l'on pourrait réaliser par la suite.

Je présente en annexe la partie instrumentale traitant de la réduction de données suivie du catalogue des galaxies de la proposition CAMACTIV. Les caractéristiques de la caméra sont résumées dans l'annexe A. Les différentes étapes de la réduction de données effectuées à l'aide du logiciel CIA ("CAM Interactive Analysis") sont décrites dans l'annexe B. Le programme d'observation regroupe 29 objets extragalactiques composés, en partie, de plusieurs galaxies en interaction. Le catalogue regroupant l'ensemble des galaxies avec leur SED en flux intégré se trouve à la fin du manuscrit en annexe C.

Chapitre 2

Les galaxies “normales” dans l’infrarouge

Sommaire

2.1	Notre galaxie dans l’infrarouge	11
2.1.1	La poussière	12
2.1.2	Les étoiles	15
2.1.3	Le gaz	17
2.2	Les galaxies normales	17
2.2.1	Les galaxies elliptiques	17
2.2.2	Les galaxies spirales	20

2.1 Notre galaxie dans l’infrarouge

Le milieu interstellaire représente seulement une petite fraction de l’ordre de 10% pour les galaxies spirales, moins pour les elliptiques, de la masse totale des galaxies constituée essentiellement d’étoiles (Combes et al., 1995). Il est constitué en grande partie par du gaz, essentiellement de l’hydrogène atomique ou moléculaire ($\sim 75\%$ de la masse) et de l’hélium ($\sim 25\%$ de la masse), le reste des éléments étant sous forme de traces. De la poussière est aussi présente dans le milieu interstellaire mais dans une très faible fraction ($\sim 1\%$ de la masse de gaz). Ainsi, notre galaxie avec une masse totale de $10^{11}M_{\odot}$ contient environ 10^7M_{\odot} de poussières. Bien qu’en faible quantité, la poussière joue un très grand rôle en absorbant les rayonnements optiques et UV provenant des étoiles et dans certains cas des noyaux actifs et en les réemettant dans l’infrarouge. L’étude en infrarouge nous permet à la fois de nous affranchir en grande partie de l’absorption tout en nous permettant d’étudier les propriétés de la poussière et du champ de rayonnement dans lequel elle baigne.

Ce chapitre a pour but de récapituler les principales propriétés de l’émission infrarouge observées localement dans notre galaxie. Pour plus de détails, on peut se référer à la

thèse de Tran, 1998. Je parlerai ensuite des galaxies normales¹ et de leurs propriétés en infrarouge vues par IRAS et par ISO. Le cadre de cette étude nous permettra par la suite de mieux comprendre les propriétés spectrales de notre échantillon composé essentiellement de galaxies starbursts et actives (voir la deuxième partie).

Dans l'infrarouge (1-1000 μm), on est sensible à trois types d'émission d'origine différente provenant par ordre d'importance: 1) de la poussière, 2) des étoiles, 3) du gaz.

2.1.1 La poussière

- L'émission infrarouge est généralement dominée par une composante spectrale large observée à 60 et 100 μm avec IRAS et piquant au delà de 100 μm (voir Fig. 2.1). Cette émission est attribuée à de gros grains de poussière (taille $> 0.01 \mu\text{m}$) en équilibre thermique ($T = 20\text{-}30\text{K}$) avec le champ de rayonnement interstellaire (Mathis, 1990).

- Une autre composante spectrale à plus courtes longueurs d'onde ($\lambda < 80 \mu\text{m}$) a été mise en évidence dans les années 80. Elle ne peut pas provenir des grains en équilibre thermique car cela impliquerait des températures de quelques centaines de Kelvin que le champ de rayonnement interstellaire est incapable de produire. Cette composante est nécessairement composée d'une population de très petits grains² (taille $< 50 \text{\AA}$). Grâce à leur petite taille, un simple photon UV peut les chauffer transitoirement à haute température ($T > 100 \text{K}$). Le grain réémet dans l'infrarouge moyen en se refroidissant bien avant qu'un autre photon ne le rencontre de nouveau. De tels grains sont suffisamment gros pour avoir une densité d'états d'énergie continue se manifestant sous la forme d'un continuum mais assez petits pour atteindre transitoirement de hautes températures (Puget and Léger, 1989).

- La présence de bandes infrarouges centrées à 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3, et 12.7 μm nécessite l'introduction d'une troisième composante de grains (voir Fig. 2.3). Leur nature étant encore incertaine, nous adoptons la dénomination courante de "Bandes Infrarouges Non-identifiées"³. Ces grains sont nécessairement de petites tailles (contenant environ plus de 80 atomes) pour atteindre transitoirement des températures de l'ordre de 600-1000K. Ils sont composés probablement de molécules carbonées émettant à des longueurs d'onde proches des modes de transitions vibrationnelles associés aux liaisons C-H et C=C. Le modèle de Léger & Puget (1984) propose l'existence de molécules composées de cycles aromatiques (i.e. des aromatiques polycycliques hydrocarbonés) appelés PAHs⁴.

Les contributions de ces composants sont décrites sur la figure 2.1 qui représente l'émission dans l'infrarouge du milieu interstellaire diffus aussi appelé "Cirrus" (Boulanger

1. J'entends par galaxies normales, celles qui n'abritent pas de régions starbursts ou d'AGN dominant l'émission de la galaxie.

2. "Very Small Grain" en anglais ou "VSG" que nous utiliserons par la suite.

3. "Unidentified Infrared Bands" en anglais ou encore UIBs, que nous utiliserons par la suite.

4. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon en anglais.

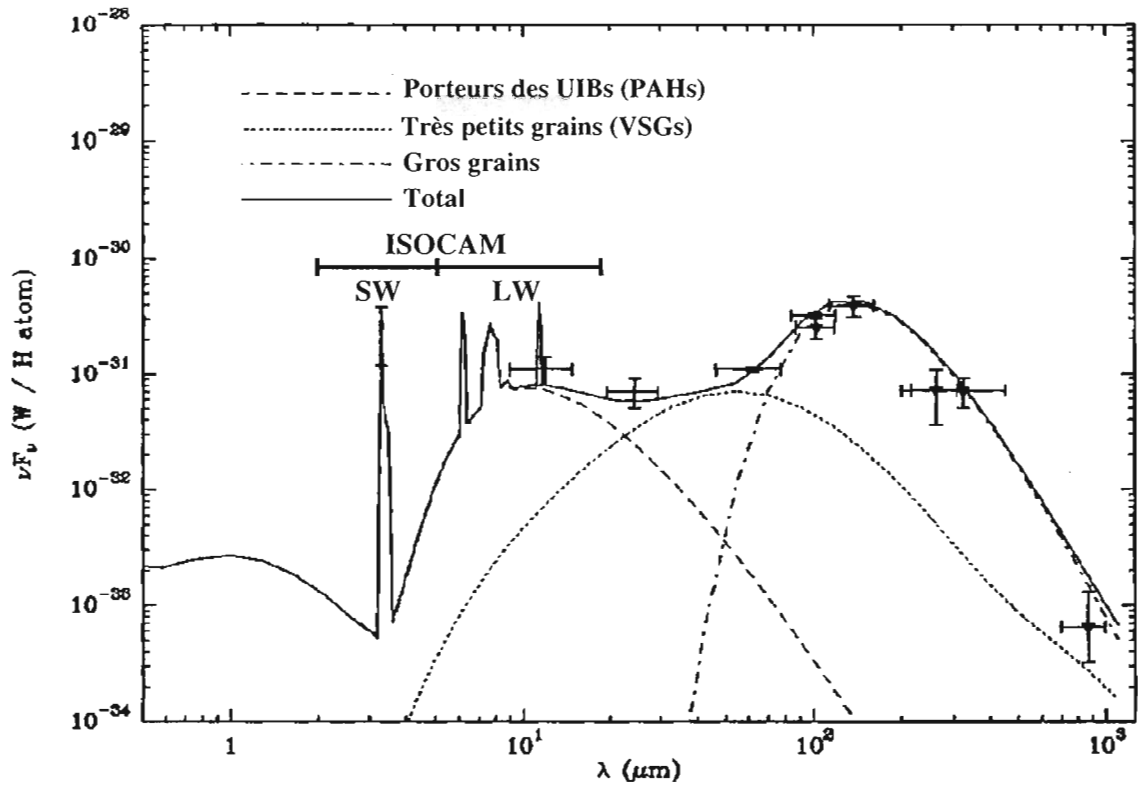


FIG. 2.1 – Décomposition spectrale de l'émission infrarouge (Desert et al., 1990). Le modèle est constitué de trois composantes provenant de trois familles de grains: les porteurs des UIBs, les très petits grains et les gros grains. La fenêtre d'observation d'ISOCAM comprise entre 2 et 18 μm est représentée en trait horizontal épais noir avec la partie à courtes et à grandes longueurs d'onde (i.e. SW et LW).

and Perault, 1988). Nous allons ainsi avec ISOCAM pouvoir étudier les UIBs et une partie de la composante des VSGs qui se trouvent dans le domaine de sensibilité de l'instrument.

Après avoir défini les principaux constituant permettant d'expliquer les SEDs en infrarouge, nous allons nous intéresser à leur localisation spatiale dans la galaxie. C'est à ce niveau que la caméra ISOCAM apporte le plus grâce à ses capacités de résolution spatiale de l'ordre de 5" dans le domaine de l'infrarouge moyen (voir l'annexe A et B). La caméra nous offre ainsi la possibilité de résoudre spatialement des régions aux propriétés différentes qui étaient auparavant non-résolues avec IRAS.

Des études de régions proches ont montré que les UIBs et le continuum des VSGs proviennent de régions différentes spatialement. Les UIBs sont majoritairement produits dans les régions de photo-dissociation⁵ qui définissent une zone intermédiaire entre la région HII complètement ionisée et les régions de gaz moléculaire à l'extérieur (Cesarsky et al., 1996b; Cesarsky et al., 1996c). Les UIBs sont également observées dans les régions diffuses loin des étoiles, ce qui rend leur présence presque universelle dans

5. "Photo-Dissociation Region" ou "PDR" en anglais

le milieu interstellaire (Giard et al., 1988; Mattila et al., 1996; Onaka et al., 1996). La contribution des VSGs observée par ISOCAM sous la forme d'un continuum aux grandes longueurs d'onde vers $14\text{-}15\text{ }\mu\text{m}$ provient essentiellement des régions HII et par conséquent pourra être utilisée comme indicateur de l'activité de formation d'étoiles (Verstraete et al., 1996; Cesarsky et al., 1996b). Dans le cas de M 17, on peut voir sur la figure 2.2 que les UIBs sont dominants dans la PDR alors que le continuum associé aux VSGs est prépondérant dans la région HII. Sur la figure 2.3, j'ai récapitulé le comportement des UIBs vis à vis du continuum des VSGs. Plus le champ de rayonnement est intense, plus le continuum augmente par rapport aux UIBs. Ce phénomène, dû à une augmentation de l'émission des VSGs, est aussi amplifié par la destruction des porteurs des UIBs par les photons UV émis par des étoiles jeunes. Il est intéressant de noter qu'ils peuvent être détruits par le rayonnement des étoiles jeunes comme dans le cas de M 17 dans la région HII et son interface. Nous verrons par la suite que cette destruction peut être aussi observée dans des régions possédant un champ de rayonnement UV-X très intense comme dans les AGNs.

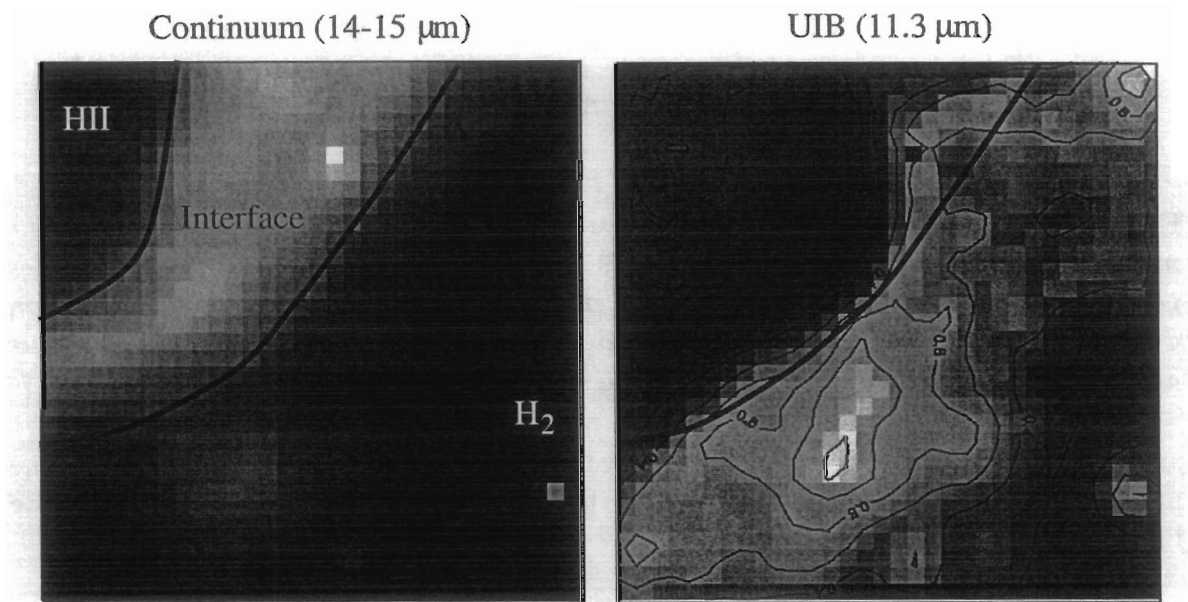


FIG. 2.2 – Observations ISOCAM de M17 (Cesarsky et al., 1996b; Tran, 1998). M17 se compose d'une région HII avec son interface (en haut à gauche) suivie d'une PDR (en bas à droite) puis de la région de gaz moléculaire (voir Tran, 1998 pour plus de détails).

Ces deux contributions UIBs et VSGs sont les deux composantes spectrales principales observées avec ISOCAM. Leur étude dans les régions galactiques a été nécessaire pour comprendre le comportement spectral de l'émission intégrée d'une galaxie. D'ailleurs, Tran (1998) a montré que les spectres dominés par de la formation d'étoiles peuvent se décomposer en première approximation en un spectre de régions HII composé uniquement d'un continuum de VSGs (avec quelques raies ioniques essentiellement de [NeII] et [NeIII]) et un spectre de PDRs dominé par des UIBs.

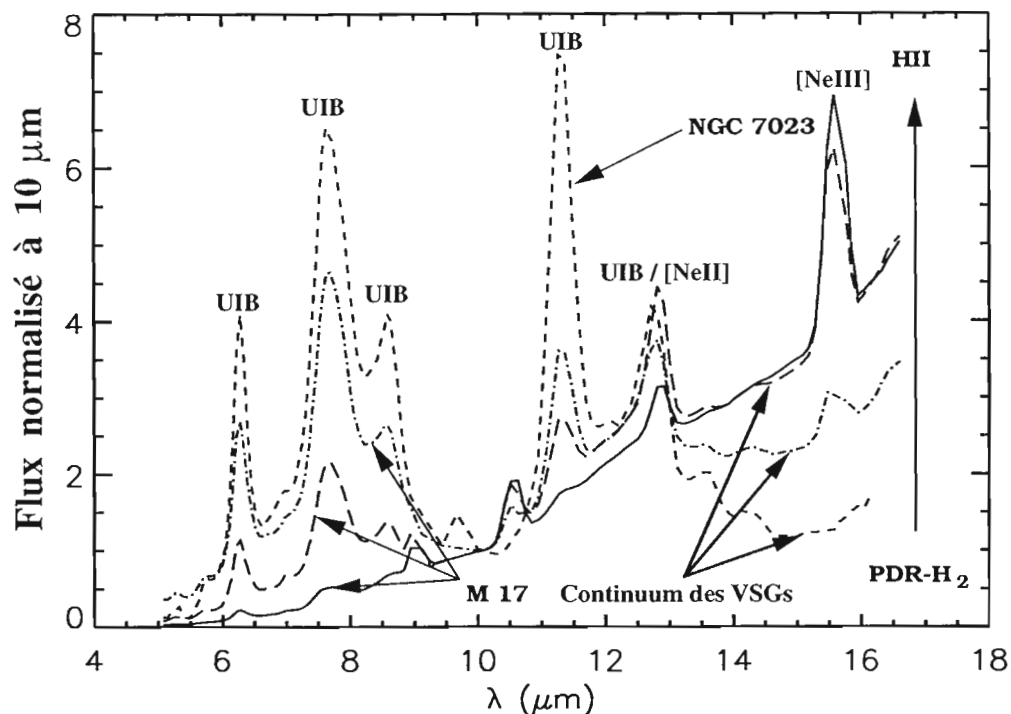


FIG. 2.3 – Evolution spectrale de l'émission en infrarouge moyen vue par ISOCAM dans une région "HII" chauffée par des étoiles OB (M17, trait continu, Cesarsky et al., 1996b) jusque dans une région PDR (NGC 7023, trait discontinu, Cesarsky et al., 1996c). Les spectres ont été normalisés à $10\mu\text{m}$. La flèche orientée vers le haut indique l'évolution des spectres en fonction du continuum des VSGs.

2.1.2 Les étoiles

Certaines étoiles peuvent contribuer à l'émission infrarouge mais essentiellement aux courtes longueurs d'onde en-dessous de $10\mu\text{m}$. Ces étoiles doivent avoir des températures de l'ordre de 3000-4000 K pour pouvoir émettre un spectre de Rayleigh-Jeans dans l'infrarouge proche et moyen. A cette température, les étoiles sont de types K ou M, c'est à dire appartenant à la classe des géantes, super-géantes ou des naines sur la séquence principale. En fait, l'émission en infrarouge proche à $2\mu\text{m}$ est dominée par la population des géantes (Frogel et al., 1978). Cette composante stellaire peut être détectée par ISOCAM dans des régions contenant peu de poussières vues en émission comme dans les galaxies de types précoces : les elliptiques et les lenticulaires. Sur la figure 2.4, deux spectres ISOCAM d'étoiles évoluées permettent de voir le profil spectral d'origine stellaire observé qui contribue à l'émission infrarouge dans les bulbes de galaxies spirales et dans les elliptiques.

Un autre type d'étoile peut aussi émettre dans l'infrarouge moyen par l'intermédiaire de la poussière chaude circum-stellaire (voir Fig. 2.5). Il s'agit d'étoiles évoluant sur

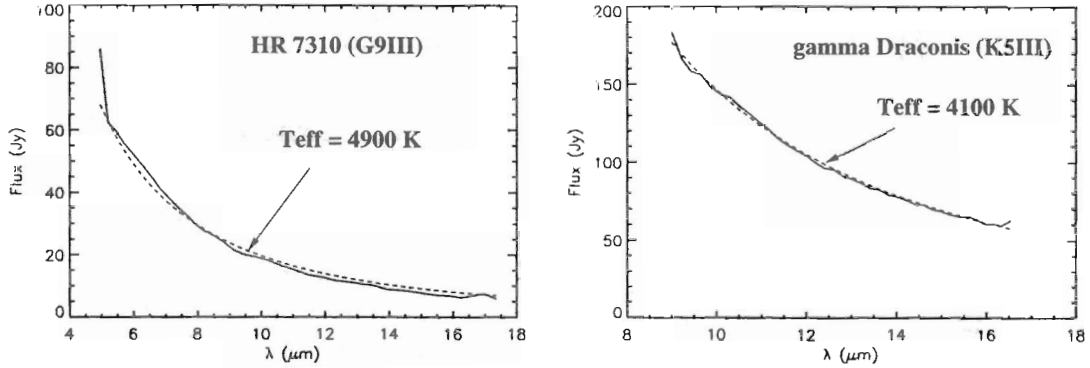


FIG. 2.4 – Spectres stellaires en infrarouge moyen. A gauche: Spectre ISOCAM de l'étoile HR 7310 (Type spectral G9III) de température effective $T = 4900$ K (Franchini et al., 1998). A droite: Spectre ISOCAM de l'étoile gamma Draconis (Type spectral K5III) de température effective $T = 4100$ K (Dyck et al., 1998). Les ajustements par des corps noirs sont représentés en tirets.

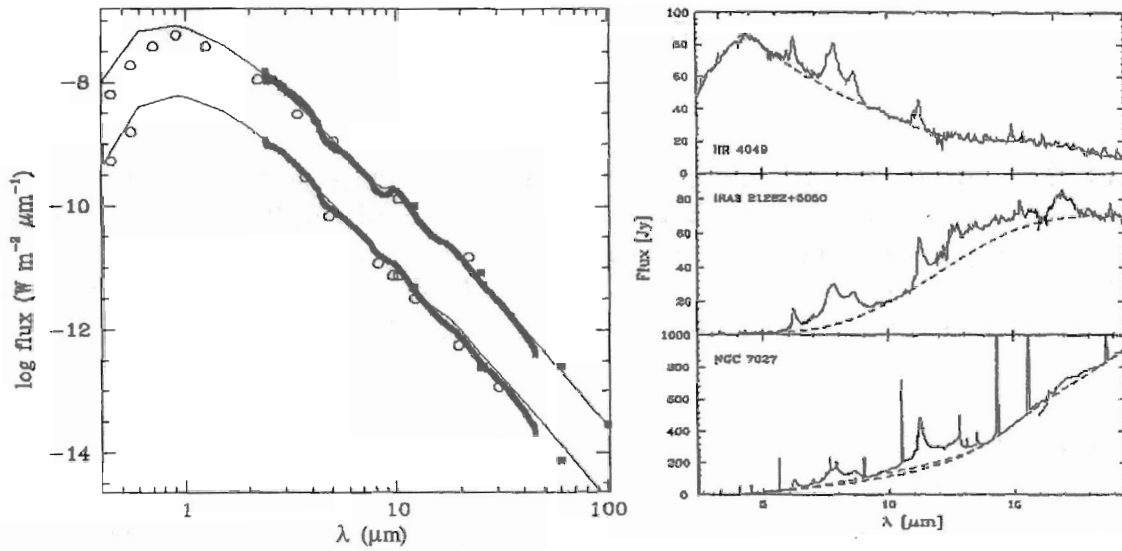


FIG. 2.5 – Contribution des poussières entourant les étoiles géantes. A gauche: Spectres de deux étoiles super-géantes α Ori (en haut) et α Sco (en bas). Les étoiles ont une température de 3600 et 3300 K respectivement cependant l'émission dans l'infrarouge moyen est attribuée essentiellement à la poussière chaude entourant l'étoile (Justtanont et al., 1999). A droite: spectres de trois étoiles évoluées riches en carbone montrant des UIBs ainsi qu'un fort continuum de VSGs (Beintema et al., 1996).

la branche asymptotique des géantes⁶ pour passer de la séquence principale jusqu'à la phase géante. Durant cette période, elles expulsent une partie de leur enveloppe externe riche en métaux et en poussières chaudes (Justtanot et al., 1997; Hron et al., 1998; Aoki et al., 1998; Yamamura et al., 1998).

6. "Asymptotic Giant Branch" ou "AGB" en anglais.

2.1.3 Le gaz

Le gaz présent dans le milieu interstellaire émet une multitude de raies dans le domaine infrarouge (Liu et al., 1996; Feuchtgruber et al., 1997). On y distingue les éléments comme le néon, l'argon, l'oxygène, le soufre, le fer pour les plus courants. Certaines raies moléculaires sont présentes comme celles du H_2 , CO, H_2O (voir Fig. 2.6). Les raies du [NeII] et [NeIII] observées avec ISOCAM sont représentées sur la figure 2.3.

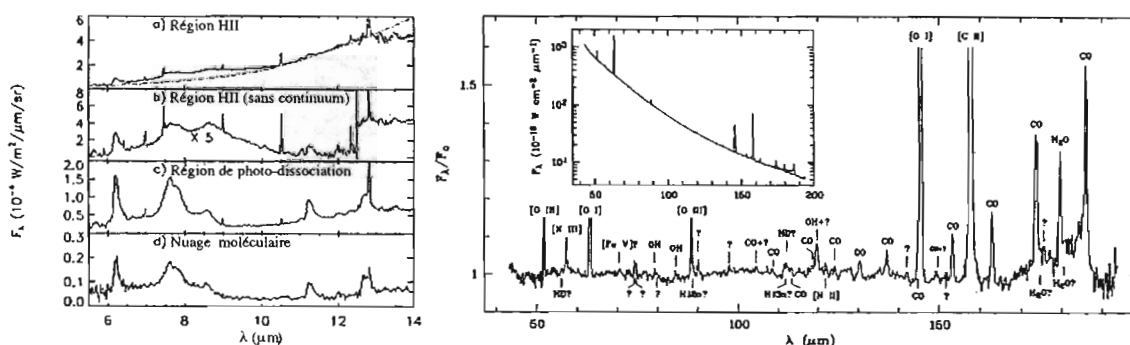


FIG. 2.6 – A droite: spectre SWS de M17 en allant de la région HII (en haut) vers la région de gaz moléculaire (en bas) (Verstraete et al., 1996). A gauche: spectre LWS de NGC 7027 (Liu et al., 1996). Un grand nombre de raies sont facilement détectées au-dessus du continuum et des UIBs avec un spectre haute résolution dans l'infrarouge.

Il est à noter que le rayonnement non-thermique synchrotron peut être détecté dans l'infrarouge et même en optique comme dans le cas du jet radio de la galaxie elliptique M87. Mais dans la plupart des galaxies, ce rayonnement reste négligeable dans l'infrarouge.

2.2 Les galaxies normales

On fait ici une brève revue des propriétés infrarouges des galaxies normales et plus particulièrement dans le domaine d'ISOCAM. Je parlerai d'abord des galaxies pauvres en gaz en introduisant d'abord les galaxies elliptiques pour passer ensuite aux galaxies spirales.

2.2.1 Les galaxies elliptiques

L'émission en infrarouge des galaxies elliptiques contenant peu de gaz et de poussières provient principalement de la population stellaire évoluée. Leur émission peut être assimilée à un continuum de corps noir à une température de 3000-5000 K (Madden et al., 1997; Boselli et al., 1998; Madden et al., 1999b). La galaxie NGC 4649 utilisée comme exemple dans la figure 2.7 possède une SED de type stellaire avec une absence significative de poussières en émission à $15\mu m$. Nous retiendrons que l'émission provenant des régions dominées par une population évoluée d'étoiles comme dans les elliptiques ou les bulbes de galaxies peut avoir une composante Rayleigh-Jeans importante entre

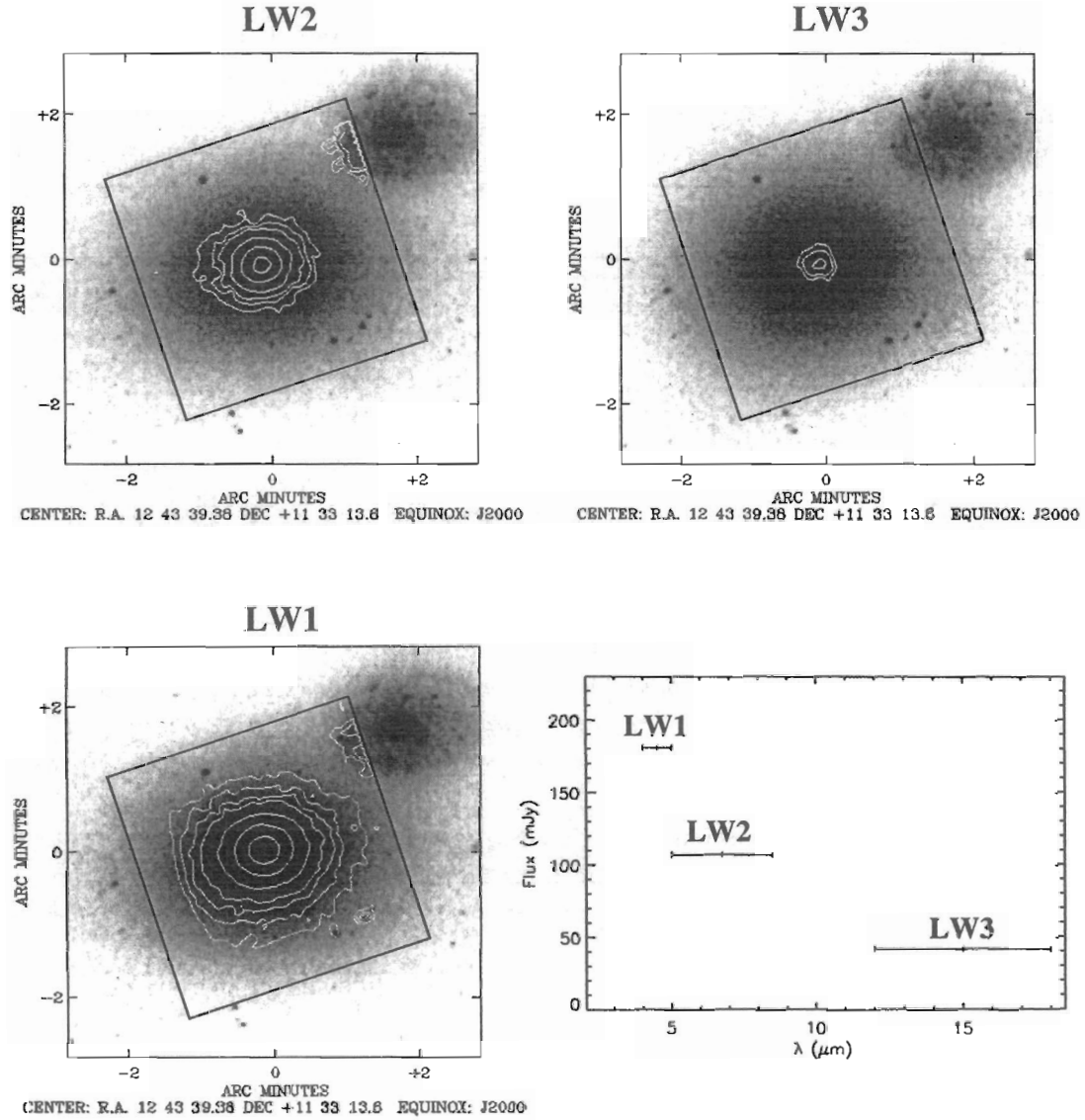


FIG. 2.7 – Observations ISOCAM de NGC 4649 en filtres larges (contours blancs) superposées à une image optique (Madden et al., 1997). La SED représentée ici par les filtres LW1 ($4.5\mu\text{m}$), LW2 ($6.75\mu\text{m}$) et LW3 ($15\mu\text{m}$) est caractéristique d’une émission stellaire. Le carré centré sur la galaxie correspond au champ d’observation d’ISOCAM.

5 et $10\mu\text{m}$. Cette composante est plus ou moins importante en fonction de l’émission de la poussière qui domine rapidement dans les galaxies riches en gaz.

Une fraction non négligeable de galaxies elliptiques riches en gaz ont un spectre typique de poussières en émission dominé principalement par les UIBs (Knapp and Rupen, 1996; Knapp et al., 1996; Madden et al., 1999b). Pour illustrer le spectre de ces galaxies, la figure 2.8 montre les observations ISOCAM d’une elliptique riche en gaz, NGC 5266 (Morganti et al., 1997; Madden et al., 1999b). Elle possède la particularité d’avoir un anneau gazeux en rotation aligné le long de la bande de poussière (Varnas et al., 1987).

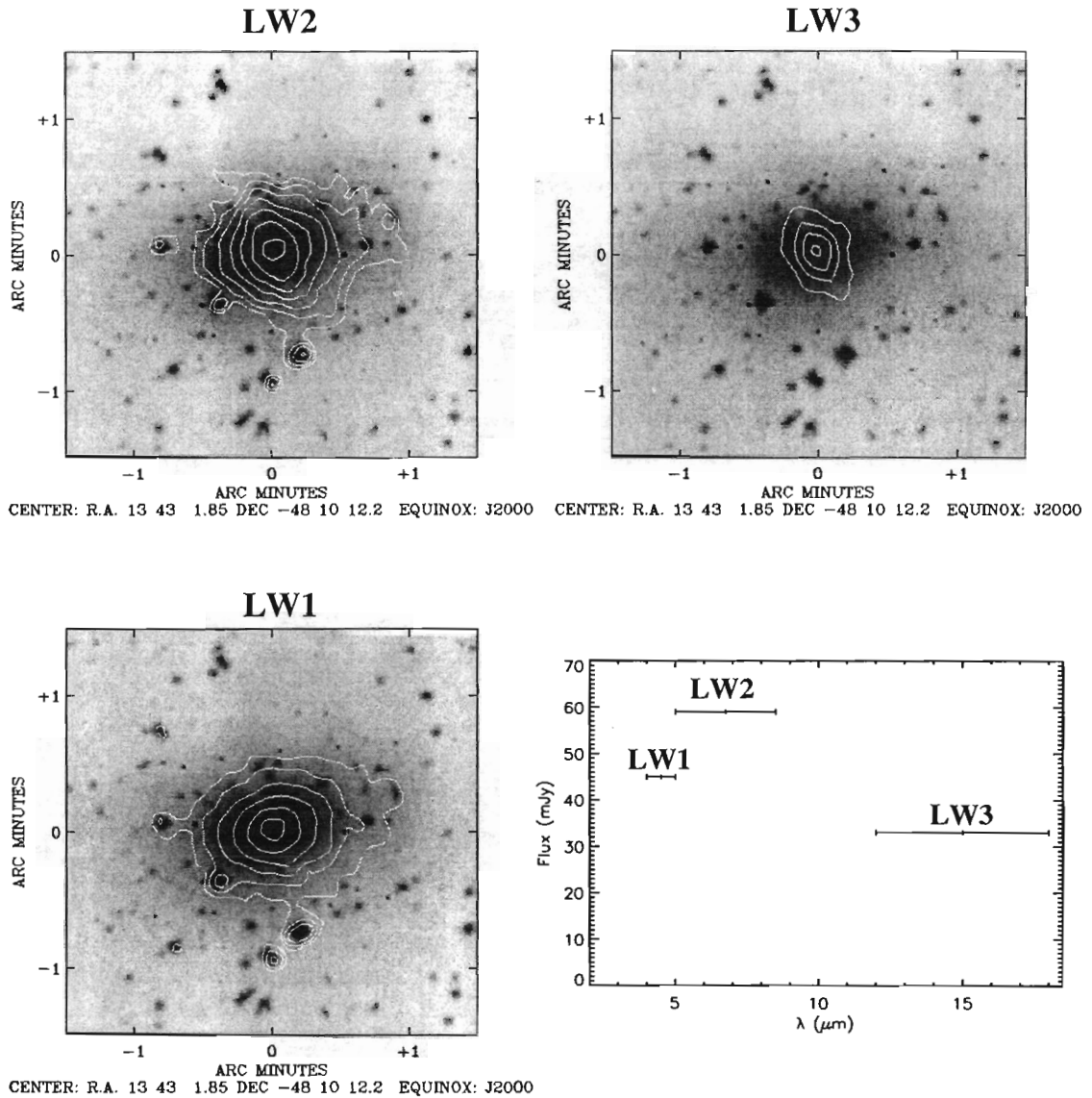


FIG. 2.8 – Observations ISOCAM de NGC 5266 en filtres larges (contours blancs) superposées sur une image optique (Madden et al., 1999b). La SED représentée par les filtres LW1($4.5\mu\text{m}$), LW2($6.75\mu\text{m}$) et LW3($15\mu\text{m}$) est composée d'une contribution stellaire (observée avec LW1) additionnée d'une émission provenant de la poussière (observée avec LW3 et en partie avec LW2).

L'émission stellaire observée à $4.5\mu\text{m}$ coïncide bien avec la distribution optique alors que l'émission à $15\mu\text{m}$ est confinée le long de cette bande d'absorption. A $7\mu\text{m}$, on trace à la fois une partie des étoiles et une partie de la poussière par l'intermédiaire des UIBs, la contribution du continuum des VSGs ne contribuant sensiblement qu'à $15\mu\text{m}$.

Certaines de ces galaxies possèdent également une source de rayonnement non-thermique en leur centre provenant d'un AGN, comme c'est le cas pour les radio-galaxies.

2.2.2 Les galaxies spirales

L'observation des galaxies spirales normales (sans starburst ou AGN dominant) a montré que leur SED dans l'infrarouge moyen est relativement constante (Vigroux, 1997; Vigroux et al., 1999). En termes de couleurs, cela se traduit par un rapport $LW2(5-8.5\mu m)/LW3(12-18\mu m)$ de l'ordre de 1 pour des couleurs IRAS f_{60}/f_{100} inférieures à 0.5 (ou $\text{Log}(f_{60}/f_{100}) < -0.3$ pour comparer avec le diagramme de la figure 1.2). Au-delà de cette valeur du rapport IRAS, on entre dans le domaine des galaxies actives ou starbursts pour lesquelles, on observe une modification notable de leurs propriétés spectrales (voir la deuxième partie).

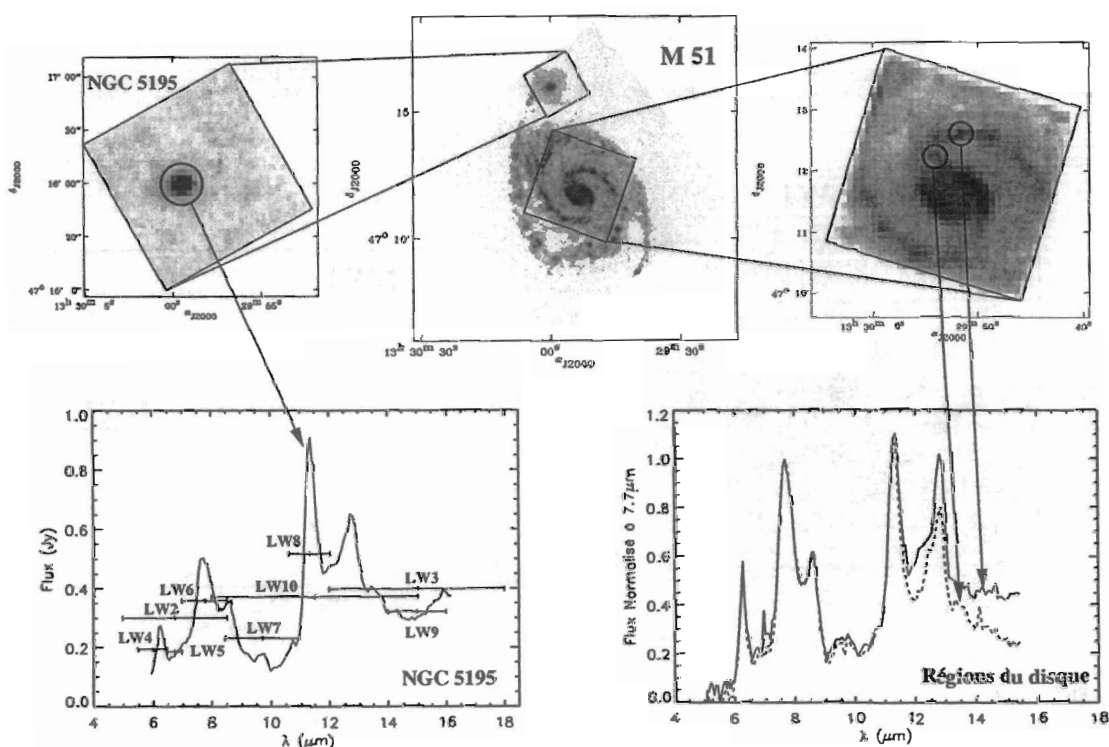


FIG. 2.9 – Observations ISOCAM de la galaxie M 51 avec son compagnon NGC 5195. En haut au milieu: Carte dans le filtre large LW2(5-8.5 μm) de l'ensemble du système. En haut à gauche: NGC 5195 observée dans le mode CVF et intégrée entre 7.6 et 8 μm . Le spectre de NGC 5195 en dessous est représenté avec les filtres équivalents estimés à partir de leur transmission. En haut à droite: Carte de la région centrale centrée sur l'UIB à 7.7 μm (intégrée de 7.4 à 8.2 μm) observée en mode CVF avec en dessous deux spectres typiques provenant des bras spiraux.

Pour illustrer les propriétés des galaxies spirales normales vues par ISOCAM, on utilise la galaxie M 51. Cette galaxie a été observée à la fois en filtres larges LW2(5-8.5 μm) et LW3(12-18 μm) ainsi qu'en mode spectro-imagerie pour la partie centrale. La résolution spatiale d'ISOCAM a permis de cartographier clairement les bras de la galaxie visibles sur la figure 2.9 (Sauvage et al., 1996). Au nord de la galaxie, on note la pré-

sence d'une galaxie lenticulaire NGC 5195 liée gravitationnellement à M51. Le spectre de NGC 5195, placé en dessous, est essentiellement composé d'UIBs. La raie ionique du [NeIII](15.6 μ m) présente dans les régions de formation d'étoiles est absente. Le continuum sous-jacent est plutôt plat contrairement à celui des VSGs. Ce type d'émission provient probablement de poussières chauffées par des photons optiques émis par des étoiles évoluées issues d'une phase d'activité starburst (Boulade et al., 1996). On a représenté l'ensemble des filtres larges compatibles avec les spectres CVFs. Les flux dans ces filtres ont été calculés à partir de la transmission des filtres larges appliquée au spectre. La sensibilité de la caméra nous permet aussi de distinguer l'émission provenant de chaque région du disque. Nous avons sélectionné un spectre (trait continu) dans une région de formation d'étoiles appartenant à l'un des bras spiraux et un autre (trait discontinu) provenant d'une région moins active dans le même bras. Ces deux spectres se distinguent essentiellement par une différence d'intensité du continuum à 14-15 μ m des VSGs. A part les faibles variations de ce continuum en fonction de l'activité de formation d'étoiles, la forme générale du spectre reste très stable dans l'ensemble de la galaxie (Sauvage et al., 1996). Il est important de noter que la région de l'inter-bras composée essentiellement d'étoiles vieilles émet également dans l'infrarouge un spectre de poussière avec $LW3(12-18 \mu\text{m})/LW2(5-8.5 \mu\text{m}) \sim 1$. Ceci démontre que les VSGs et les UIBs peuvent être chauffés par un champ de rayonnement faible en intensité et en UV. Un autre exemple de chauffage par des photons optiques provenant d'étoiles évoluées est observé pour la galaxie NGC 5195 (voir Fig. 2.9).

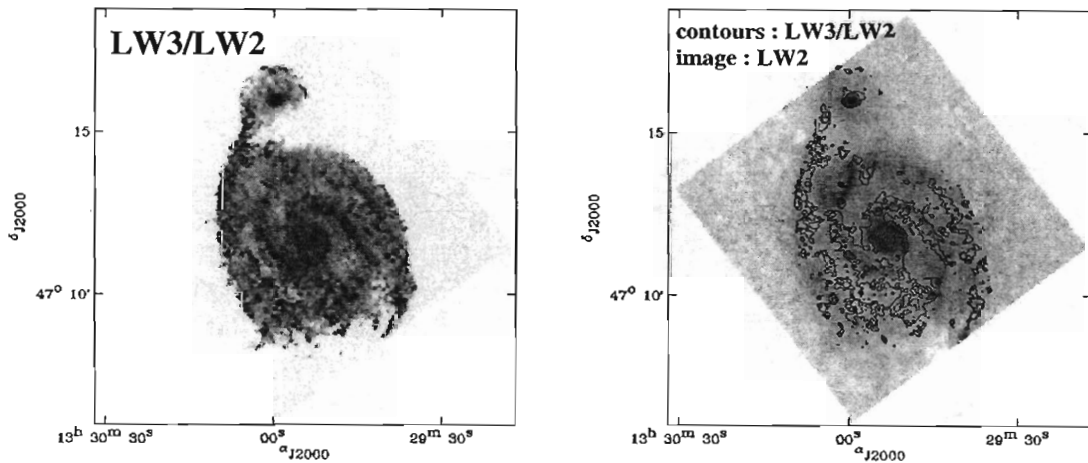


FIG. 2.10 – A gauche: Carte de couleur $LW3(12-18 \mu\text{m})/LW2(5-8.5 \mu\text{m})$ de M51. Les deux cartes LW2 et LW3 ont été mises à la même résolution spatiale en convoluant l'image LW2 par la fonction de transfert instrumentale du filtre LW3 et réciproquement ce qui donne encore une résolution finale acceptable pour cette galaxie. Les pixels dont le flux est inférieur à 5σ pour LW2 ont été masqués. A droite: Image dans le filtre LW2 avec les contours LW3/LW2 égaux à 1 et 1.2. Les régions présentant les plus forts rapports LW3/LW2 sont bien corrélées avec les bras spiraux où se forment les étoiles.

Les spectres des galaxies normales sont dominés en grande partie par les UIBs avec un continuum de VSGs faible. Par conséquent, la contribution des régions HII "pures" présentant un fort continuum (par exemple M17 vu au chapitre précédant) n'est pas dominante. Ce sont les régions responsables de l'émission des bandes qui rendent compte de la presque totalité du flux, à savoir les régions de photodissociation entourant les régions HII. Les régions diffuses contribuent aux UIBs dans les régions pauvres en formation d'étoiles comme dans les zones d'inter-bras.

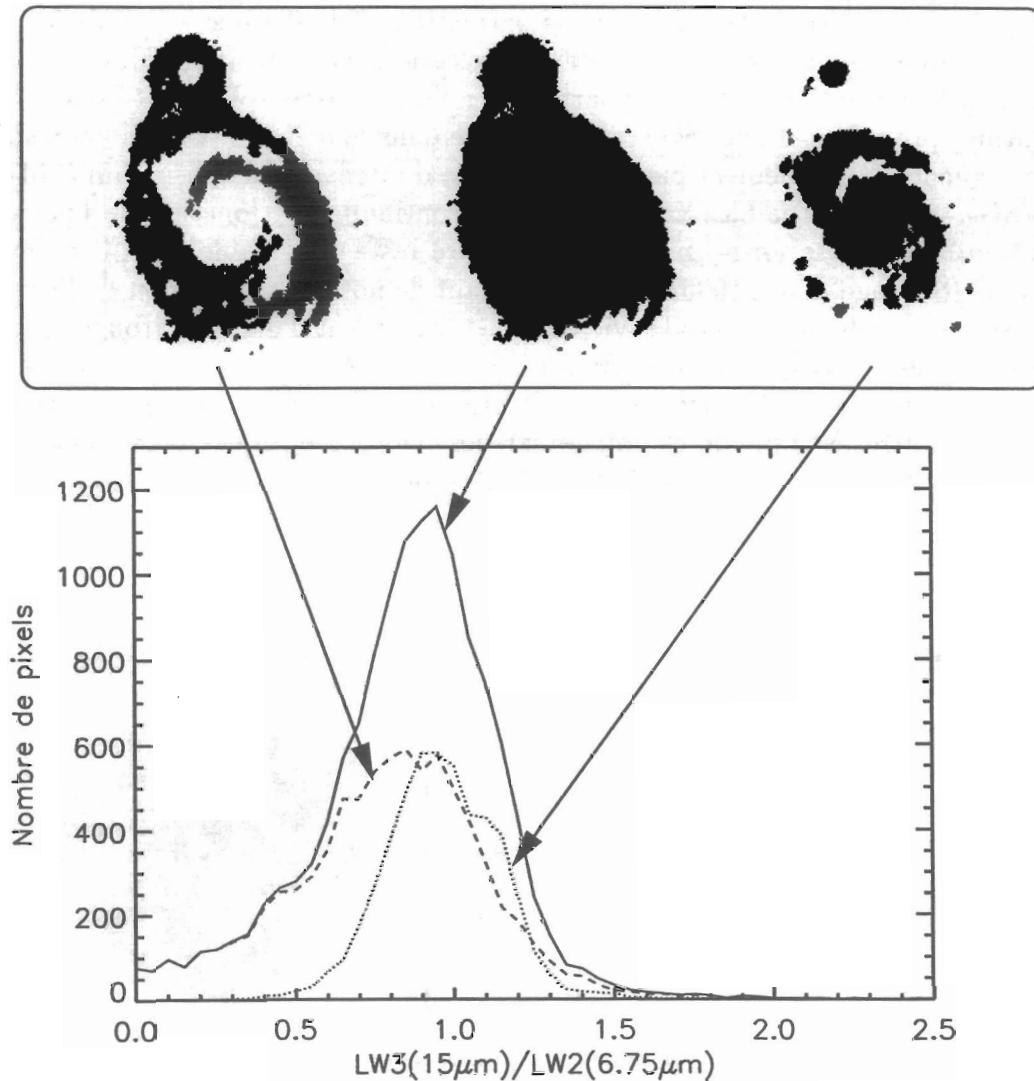


FIG. 2.11 – Variation du rapport $LW3(12-18\mu m)/LW2(5-8.5\mu m)$ dans M51. En haut, on a représenté les régions de la galaxie sélectionnées pour estimer le rapport $LW3/LW2$. A gauche, seules les régions de faibles brillance de surface sont utilisées pour caractériser les régions inter-bras du disque de M51 ($Flux < 0.5$ mJy/pixel de $3''$, 62% des pixels). Au milieu, on calcule le rapport sur toute la galaxie et à droite, on sélectionne la région des bras spiraux ($Flux > 0.5$ mJy/pixel de $3''$, 38% des pixels). En bas, le diagramme représente l'histogramme (par pas de 0.05 pour $LW3/LW2$) de l'ensemble des 3 régions précédemment définies. Dans les bras, le rapport $LW3/LW2$ est supérieur à celui des régions inter-bras.

Bien que les spectres des galaxies spirales normales se ressemblent fortement, de petites variations du rapport des filtres larges $LW3(12-18\mu m)/LW2(5-8.5\mu m)$ sont détectées dans les disques des galaxies. Ceci est bien visible dans le disque de M51 où le rapport oscille entre 0.6 et 1.3. Ce rapport devient légèrement plus important dans les régions des bras spiraux où se forment les étoiles (Sauvage et al., 1996). Bien que ces variations soient faibles, la carte de couleur $LW3(12-18\mu m)/LW2(5-8.5\mu m)$ de la figure 2.10 permet de distinguer les bras spiraux avec les couleurs les plus rouges, là où la contribution des régions HII augmente vis à vis de celle des PDRs et des régions diffuses.

On peut d'ailleurs estimer les variations des composantes HII/PDR pour rendre compte de l'augmentation du rapport $LW3/LW2$ (voir Tran, 1998 pour plus de détails). Ces différentes régions ne contribuent pas de la même façon à l'émission totale de la galaxie. Sur la figure 2.12, les régions des bras (38% en surface, voir Fig. 2.11) dominent largement le flux intégré avec 73% de la luminosité infrarouge. La composante inter-bras ne participe que pour 27% à l'émission totale. Lors de la sélection des régions les plus brillantes, les régions centrales ($\sim 1'$ en diamètre) très brillantes ont été incluses dans l'émission des bras. Leurs fortes intensités couplées avec un plus fort rapport $LW3/LW2$ (~ 1.15) fait apparaître un deuxième pic sur l'histogramme de la figure 2.12. Cette contamination importante du noyau sur le rapport $LW3/LW2$ a été étudiée par Roussel et al. (1999) sur un large échantillon de galaxies. D'ailleurs, l'émission totale à $15\mu m$ est dominée par les régions avec $LW3/LW2=1.15$, essentiellement centrales, où la fraction de régions HII est plus importante.

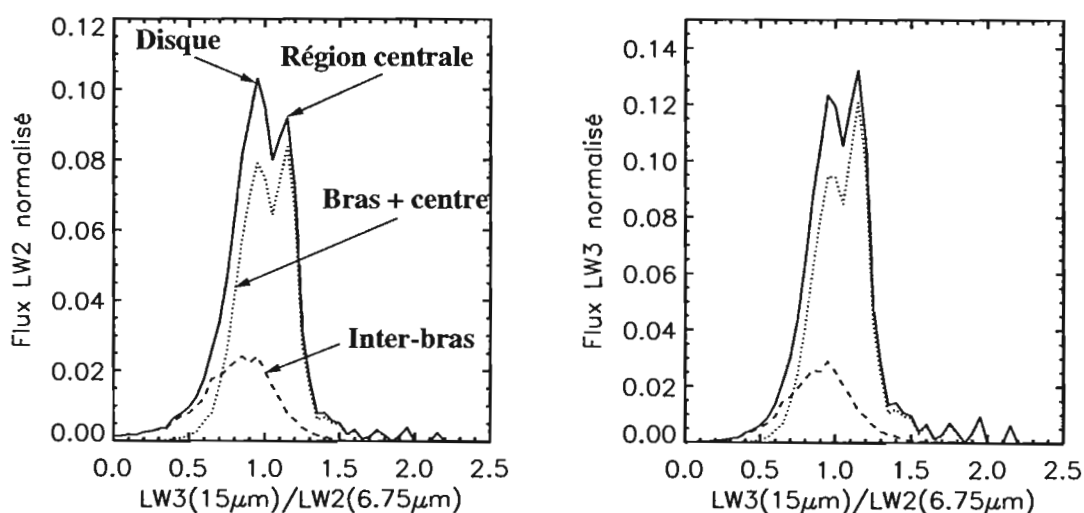


FIG. 2.12 – Variation de la contribution du flux dans $LW2$ (à gauche) et $LW3$ (à droite) en fonction de $LW3(12-18\mu m)/LW2(5-8.5\mu m)$. Ce diagramme a été obtenu en utilisant les mêmes régions que précédemment (voir Fig. 2.11). La somme des flux a été normalisée à 1 avec un pas de 0.05 pour $LW3/LW2$. On obtient deux pics d'émission pour $LW2$ et $LW3$ centrés sur $LW3/LW2=0.95$ et $LW3/LW2=1.15$.

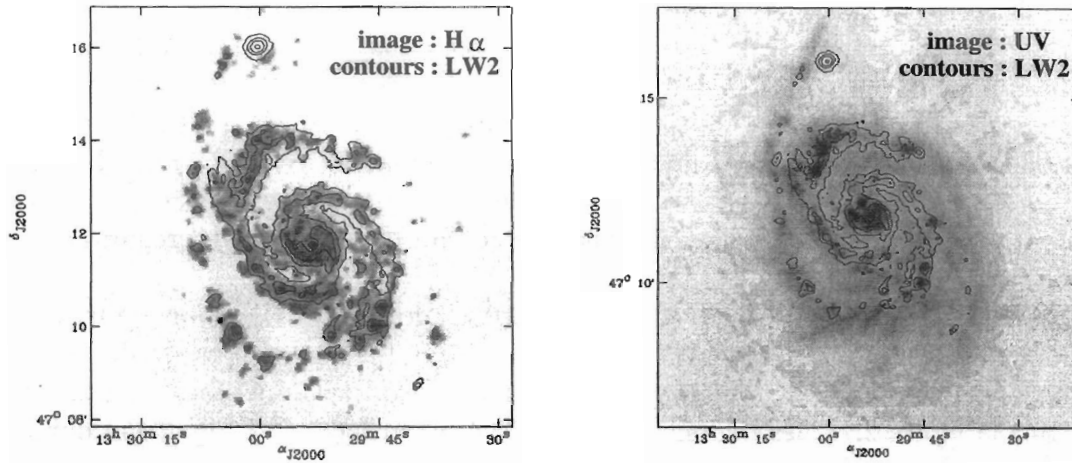


FIG. 2.13 – Comparaison de l'émission infrarouge avec la carte $H\alpha$ et UV. A gauche: Carte $H\alpha$ de M51. A droite: Carte UV de M51. Pour les deux cartes, les mêmes contours LW2 correspondant aux régions des bras spiraux ont été utilisés. On peut noter la bonne correspondance spatiale entre la carte ISOCAM à 5-8.5 μm avec celles en $H\alpha$ et en UV qui tracent les étoiles jeunes présentes dans les bras de la galaxie.

Sur la figure 2.13, l'émission en $H\alpha$ et UV qui tracent les étoiles jeunes (et par conséquent les régions HII) est bien corrélée à l'émission à 7 μm . La carte LW3/LW2 de la figure 2.10 représentant les régions les plus actives en formation d'étoiles à partir de l'infrarouge est aussi très bien corrélée avec le $H\alpha$ et l'UV. Il est important de souligner que l'absorption affectant la raie $H\alpha$ et l'émission UV est suffisamment faible dans ce cas pour nous permettre de voir l'ensemble des régions du disque. Cela confirme bien que les régions les plus brillantes en infrarouge moyen, qui sont aussi celles possédant le plus fort rapport LW3/LW2, sont caractérisées par une plus grande contribution de régions HII. La bonne corrélation spatiale dans le disque⁷ entre l'infrarouge moyen et les traceurs de formation d'étoiles usuels, tels que la raie $H\alpha$, indique que l'émission en infrarouge moyen entre 5 et 18 μm peut être utilisée comme indicateur de formation d'étoiles (voir Roussel et al., 1999).

Il est important tout de même de rappeler que dans les galaxies normales, les UIBs et donc les PDRs dominent tout de même l'émission en infrarouge moyen. Il faut observer des régions extrêmes en formation d'étoiles, telles que celles rencontrées dans les galaxies starbursts, pour voir l'émission des régions HII dominée par leur continuum.

7. Dans le noyau, la forte absorption du $H\alpha$ rend l'estimation du taux de formation d'étoiles incertaine. De plus, l'émission infrarouge change de "régime" avec l'augmentation significative de LW3/LW2.

Deuxième partie

Emission en infrarouge moyen des
régions à flambées de formation
d'étoiles et des noyaux actifs

Chapitre 3

Les galaxies à flambées de formation d'étoiles

Sommaire

3.1	Introduction	27
3.2	Deux prototypes : M 82 et NGC 253	27
3.2.1	M82 : La galaxie starburst de l'hémisphère nord	28
3.2.2	NGC 253 : La galaxie starburst de l'hémisphère sud	38
3.3	Une galaxie starburst extrême: II Zw 40	40

3.1 Introduction

Nous avons introduit dans les chapitres précédents l'ensemble des propriétés spectrales dans l'infrarouge moyen des galaxies normales. Cela nous a permis de définir les principaux composants responsables de l'émission, à savoir essentiellement les porteurs des UIBs et les VSGs, la contribution stellaire ne contribuant significativement que dans les galaxies elliptiques pauvres en gaz. Nous avons vu que l'émission intégrée des galaxies normales est essentiellement composée de ces UIBs, le continuum ne contribuant que faiblement à l'émission. Néanmoins, les régions de formation d'étoiles rencontrées dans les bras spiraux ainsi que dans le centre des galaxies se distinguent par une augmentation du continuum des VSGs produit essentiellement dans les régions HII par rapport à la contribution des UIBs provenant des PDRs périphériques (les régions diffuses bien qu'émettant aussi des UIBs ne contribuent pas de façon importante à l'émission globale). L'étude des galaxies starbursts va nous permettre d'aller encore plus loin dans l'étude de l'activité de formation d'étoiles observée avec ISOCAM.

3.2 Deux prototypes : M 82 et NGC 253

Dans cette partie, on présente les observations ISOCAM en mode spectro-imagerie de deux galaxies starbursts proches, M 82 et NGC 253. La galaxie M 82 située à 3.6 Mpc

(17 pc arcsec⁻¹, Freedman et al., 1994) permet d'étudier l'émission en infrarouge moyen sur l'ensemble de la galaxie des régions starbursts centrales jusqu'au disque avec une résolution spatiale de 6", soit environ 100 pc. Dans un deuxième temps, l'observation avec le meilleur échantillonnage spatial (1.5"/pixel) de la galaxie NGC 253 située à une distance de 3.4 Mpc (16.5 pc arcsec⁻¹, Sandage and Tammann, 1975) nous renseignera sur les propriétés de l'émission en infrarouge moyen associée à l'activité starburst dans les régions centrales.

3.2.1 M82 : La galaxie starburst de l'hémisphère nord

La galaxie starburst M82 possède une luminosité infrarouge de $\sim 3 \times 10^{10} L_{\odot}$ (Telesco, 1988). Cette émission provient essentiellement d'une région starburst de ~ 500 pc de long, parallèle à l'axe principal de la galaxie. La figure 3.1 montre la morphologie complexe en optique qui résulte de l'interaction gravitationnelle avec la galaxie M81 située à 36 kpc (Yun et al., 1993). On voit très clairement l'effet des bandes de poussière en optique conduisant à une forte absorption de l'ordre de $A_V \sim 5-15$ dans les régions centrales starbursts (Larkin et al., 1994). L'observation avec ISOCAM nous permet de révéler les régions starbursts dans l'infrarouge avec un champ d'observation de 1.5' centré sur la galaxie.

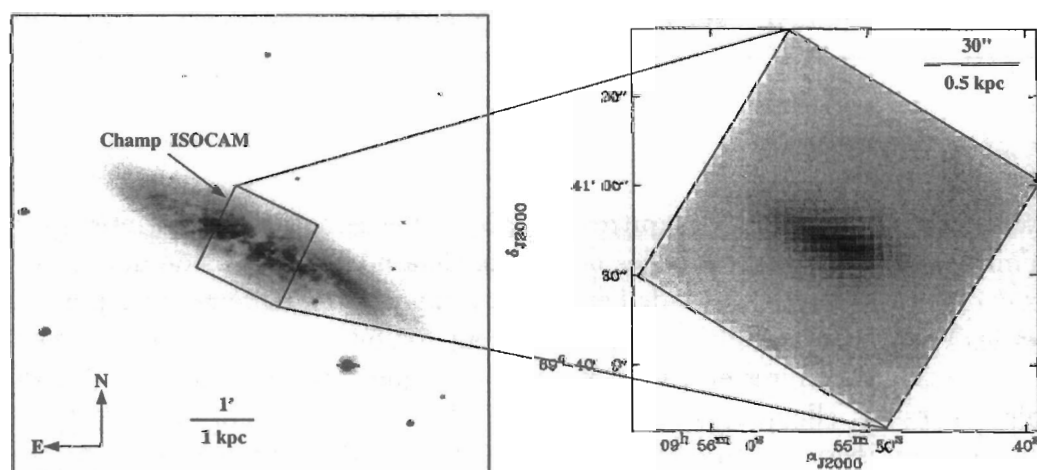


FIG. 3.1 – La galaxie M82 en optique (à gauche) et en infrarouge moyen (à droite).

L'existence probable d'une barre permettrait d'alimenter en matière le starburst au centre de la galaxie (Achtermann and Lacy, 1995). Il en résulte un nombre important de supernovae (0.1 an^{-1} , Van Buren and Greenhouse, 1994) à l'intérieur d'une région de ~ 250 pc. Ces supernovae accélèrent le milieu environnant en formant un vent bipolaire composé de gaz chaud et dense observé en rayonnement X ($T = 10^6 - 10^7$ K, densité $= 10^{-3} - 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$, Bregman et al., 1995; Moran and Lehnert, 1997).

La galaxie M82 a été observée en mode spectro-imagerie entre 5 et 16 μm et en filtres larges SW centrés sur l'UIB à 3.3 μm (SW2), le continuum entre 3.5-4 μm (SW6, simi-

laire à la bande L) et la raie $\text{Br}\alpha$ (SW8). Cette galaxie nous permet d'explorer grâce aux spectres en mode CVF l'ensemble des propriétés spectrales dans l'infrarouge moyen associées à l'activité de formation d'étoiles. Sur la figure 3.2, on a représenté le spectre de la région starburst nucléaire (à gauche) et celui caractérisant l'émission provenant du disque de la galaxie (à droite). Le spectre starburst se distingue nettement par la présence d'un continuum important vers les grandes longueurs d'onde alors que le disque au contraire est dominé par la contribution des UIBs. On obtient de ce fait un fort rapport $\text{LW3}/\text{LW2}=1.9$ dans le spectre de la région starburst centrale. Le spectre des régions du disque de M 82 montre un rapport $\text{LW3}/\text{LW2}=1.4$ typique des régions de formation d'étoiles dans les bras et les noyaux de galaxies spirales normales comme M 51 vue au chapitre précédent.

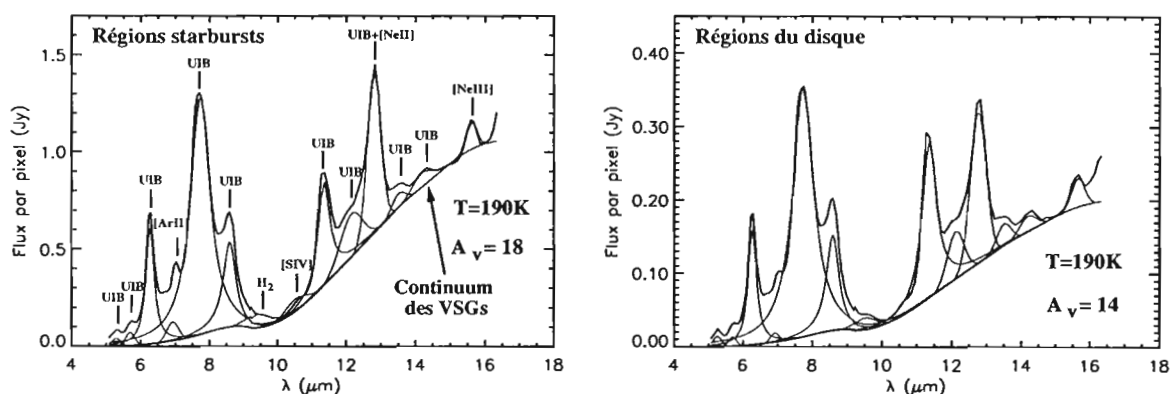


FIG. 3.2 – Spectres de la région centrale starburst (500 pc) et du disque de M82 modélisés par trois composantes: UIBs, raies et continuum.

Dans le but de séparer quantitativement la contribution provenant des VSGs de celle des UIBs, le continuum des VSGs a été modélisé par un corps noir ($T \sim 200$ K) affecté par une loi d'extinction utilisant d'un modèle d'écran (Dudley and Wynn-Williams, 1997). Bien que ce continuum ne puisse pas être émis par des grains en équilibre thermique, on arrive à ajuster convenablement le continuum restant après soustraction des UIBs et des raies. Les UIBs sont correctement ajustées avec des profils lorentziens (Boulanger et al., 1998). Ce profil est une conséquence de la redistribution de l'énergie interne vibrationnelle entre les différents modes accessibles avec un temps caractéristique de l'ordre de 10^{-13} s après l'absorption d'un unique photon. Ce processus se produit par l'apport d'une grande quantité d'énergie dans une grande molécule et permet de peupler l'ensemble des modes de façon continue. La largeur importante des bandes est une conséquence directe de la très courte durée de vie de l'état excité. On remarque aussi plusieurs raies d'émission à 5.3, 5.7, 12, 13.6, 14.3 μm pouvant être attribuées à des UIBs (Verstraete et al., 1996; Beintema et al., 1996; Sloan et al., 1999). Les valeurs des flux vers 16 μm restent très incertaines à cause de l'important effet de mémoire au début de l'observation. L'estimation du flux dans la raie du [NeIII] peut en être ainsi très fortement affectée.

On peut utiliser cette décomposition sur plusieurs régions de la galaxie pour suivre l'évolution du continuum non seulement à 14-15 μm mais aussi à 5-10 μm où les UIBs

dominant l'émission. En haut de la figure 3.3, on a représenté l'émission provenant des régions centrales de la galaxie où se trouve le starburst. Les spectres de ces régions se distinguent des spectres de galaxies normales par la présence d'un fort continuum croissant associé aux VSGs. On détecte aussi très clairement la raie du [NeIII] traçant les régions HII. Au milieu, on a sélectionné des régions moins intenses en activité de formation d'étoiles. Ces régions possèdent un plus faible continuum ainsi que des raies du [NeIII] également moins intenses. En bas, on arrive dans les régions extérieures au starburst où les spectres deviennent très similaires à ceux déjà rencontrés dans les disques de galaxies normales car ils sont essentiellement dominés par les UIBs provenant des PDRs. Le long de cette séquence, on peut voir l'importance du continuum comme traceur d'activité de formation d'étoiles.

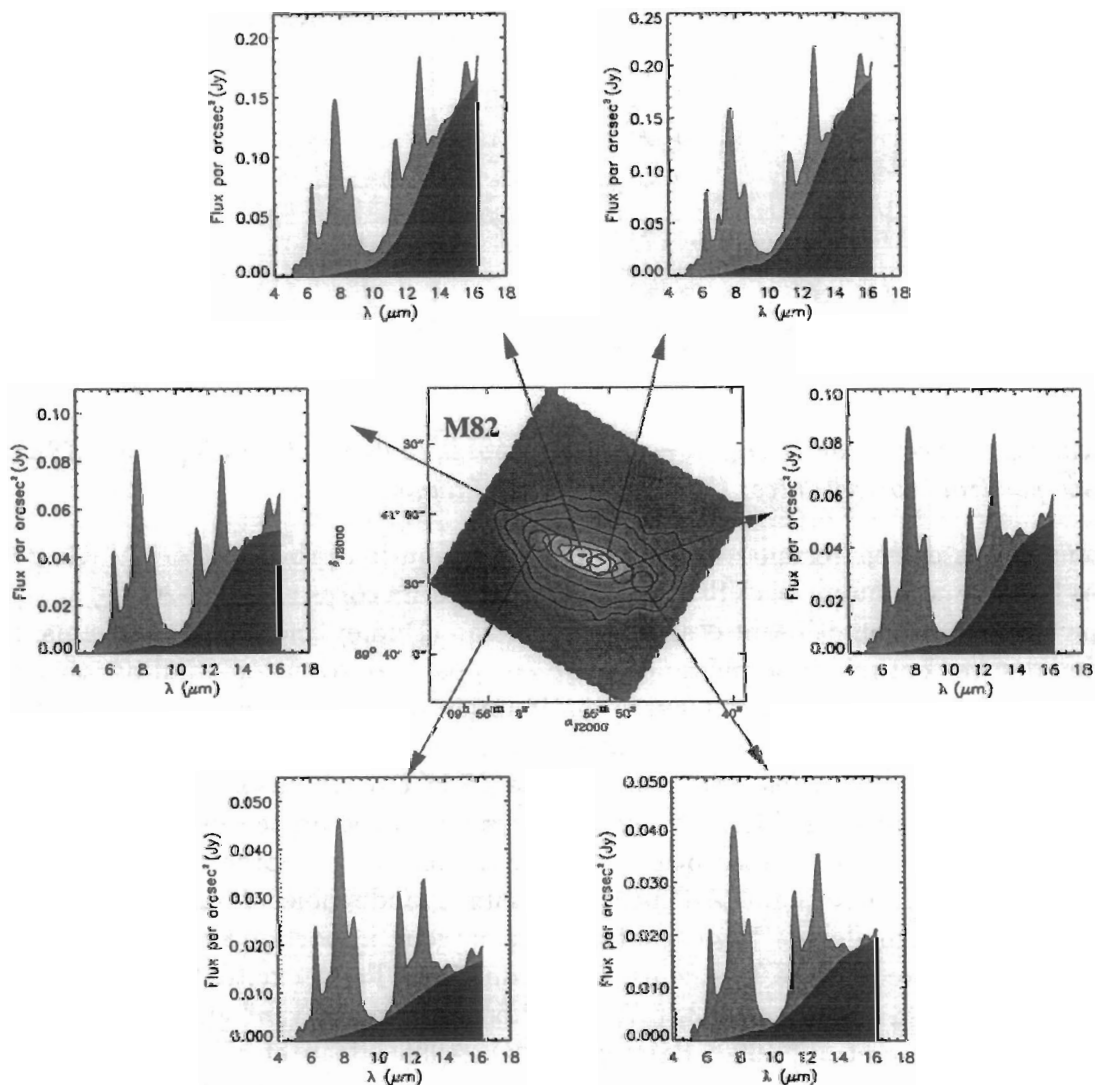


FIG. 3.3 – Spectres ISOCAM des différentes régions de M82. La carte centrale représente la galaxie observée dans le filtre large LW2(5-8.5 μm). Le continuum (couleur foncée) est modélisé par un profil de corps noir et les UIBs (couleur claire) ont été ajustées par des profils lorentziens.

Sur la figure 3.4, tous les spectres observés dans M 82 ont été superposés dans le but de suivre les variations spectrales de l'émission infrarouge. Ces spectres couvrent l'ensemble des régions de M 82 en allant des régions éloignées du noyau jusqu'au centre même de la galaxie. Ces spectres sont très peu variables dans la région des UIBs entre 5 et 9 μm . Il est vrai qu'ils ont été normalisés sur la bande infrarouge à 7.7 μm mais néanmoins, les écarts relatifs entre les UIBs situées à 6.2 et 8.6 μm sont très faibles. Cela permet dans ce domaine spectral d'envisager un ajustement systématique de ces bandes infrarouges par un modèle de spectre dominé par des UIBs comme dans les PDRs (Tran, 1998). Ainsi il est très difficile d'estimer l'activité starburst à partir des propriétés spectrales observées entre 5 et 11 μm , il est nécessaire d'aller au-delà de 11 μm pour pouvoir distinguer les régions starbursts des régions du disque.

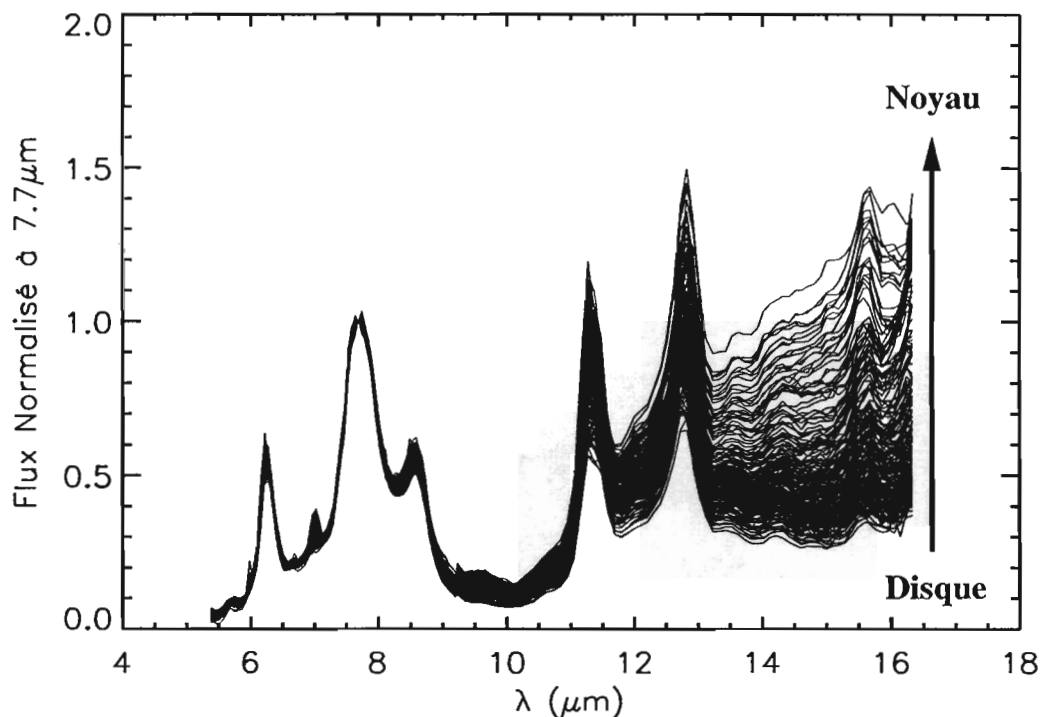


FIG. 3.4 – Variations spectrales en infrarouge moyen dans M 82. L'ensemble des spectres obtenus dans M 82 ont été normalisés sur l'UIB à 7.7 μm . Les régions avec un faible continuum proviennent du disque puis en se dirigeant vers le centre starburst (Noyau), on augmente progressivement la contribution du continuum des VSGs.

C'est dans la partie à grandes longueurs d'onde que les variations spectrales deviennent très importantes. Elles sont imputables essentiellement à la variabilité du continuum des VSGs ainsi qu'aux effets de l'absorption par les silicates entre 9 et 12 μm . Les variations de l'intensité des raies du néon dans les régions starbursts sont également très nettes surtout dans le cas de la raie du [NeII] à 12.8 μm qui est confondue avec l'UIB à 12.7 μm . On a ainsi tendance à vouloir séparer l'émission en deux composantes, les UIBs associées aux PDRs et le continuum associé aux régions HII. Dans sa thèse, Tran (1998) a effectivement montré que l'on pouvait rendre compte au 1^{er} ordre de la forme générale du spectre à partir de deux spectres provenant d'une PDR et d'une

région HII. Il est très important de remarquer que la grande variabilité du continuum à $14-15\mu\text{m}$ n'affecte en aucune façon l'émission des UIBs entre $5-9\mu\text{m}$. En d'autres termes, la contribution du continuum des VSGs semblent être négligeable en dessous de $9\mu\text{m}$.

La SED continue entre 5 et $16\mu\text{m}$ obtenue en mode CVF permet de mieux comprendre les propriétés spectrales sélectionnées par les filtres larges (i.e. UIBs, raies, continuum). Sur la figure 3.5, le rapport $\text{LW3}(12-18\mu\text{m})/\text{LW2}(5-8.5\mu\text{m})$ montre une très bonne corrélation avec le rapport $[\text{Continuum des VSGs}]/[\text{Intensité des UIBs}]$ (ici 6.2 et $7.7\mu\text{m}$). Il peut donc, dans le cas des galaxies à formation d'étoiles, être utilisé pour estimer le rapport Continuum/UIBs. Les raies ioniques du néon ainsi que l'UIB à $12.7\mu\text{m}$ ne contribuent pas significativement dans le filtre LW3 entre 12 et $18\mu\text{m}$. En admettant que, dans ces régions, le continuum provienne effectivement des régions HII alors que les UIBs seraient produites dans les PDRs, le rapport $\text{LW3}/\text{LW2}$ peut être utilisé comme indicateur d'efficacité de formation d'étoiles. Dans cette hypothèse, plus la densité de régions HII augmenterait dans un volume donné et plus le continuum deviendrait prépondérant vis à vis des UIBs.

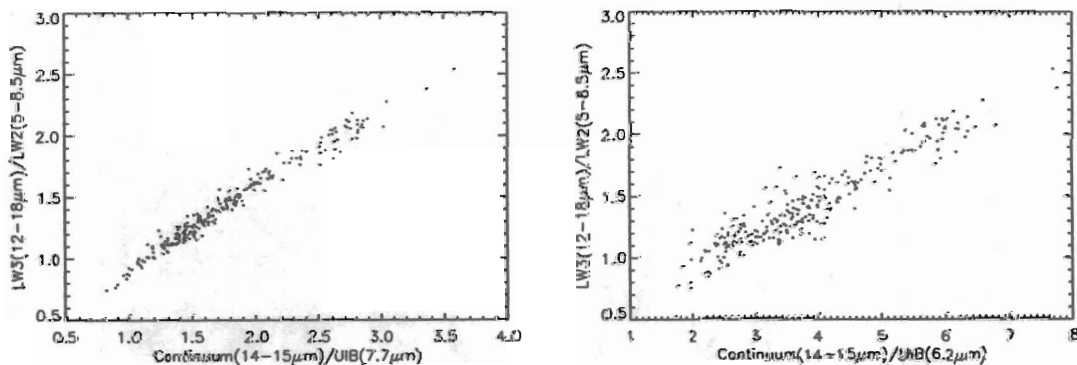


FIG. 3.5 – Variation de $\text{LW3}(12-18\mu\text{m})/\text{LW2}(5-8.5\mu\text{m})$ en fonction des UIBs et du continuum des VSGs. Le rapport $\text{LW3}/\text{LW2}$ peut être utilisé pour estimer le rapport $[\text{Continuum (VSGs)}]/[\text{UIBs (molécules carbonées, PAHs)}]$.

La figure 3.6 montre que la présence des régions starbursts centrales induit des rapports $\text{LW3}(12-18\mu\text{m})/\text{LW2}(5-8.5\mu\text{m})$ ¹ entre 2 et 2.5 bien supérieurs à ceux habituellement mesurés dans les galaxies spirales normales. L'augmentation de ce rapport correspond effectivement à une plus grande contribution du continuum des VSGs observé à $14-15\mu\text{m}$ (voir Fig. 3.3). On note immédiatement la présence d'une distribution bimodale similaire à celle déjà observée dans M51 dans le chapitre précédent. Le disque est caractérisé par un rapport $\text{LW3}/\text{LW2}$ centré sur 1.2 alors que les régions starbursts localisées dans le noyau présentent des rapports décalés vers $2-2.5$. Les régions centrales sont caractérisées par un continuum montant important visible entre les raies du [NeII] et [NeIII]. A mesure que l'on se déplace le long de la barre (Larkin et al., 1994) dans le plan du disque, le continuum diminue en intensité pour donner finalement un spectre de galaxie "normale" dominée par les PDRs.

1. Les flux dans les filtres LW ont été calculés à partir des spectres CVF en utilisant la transmission de chaque filtre.

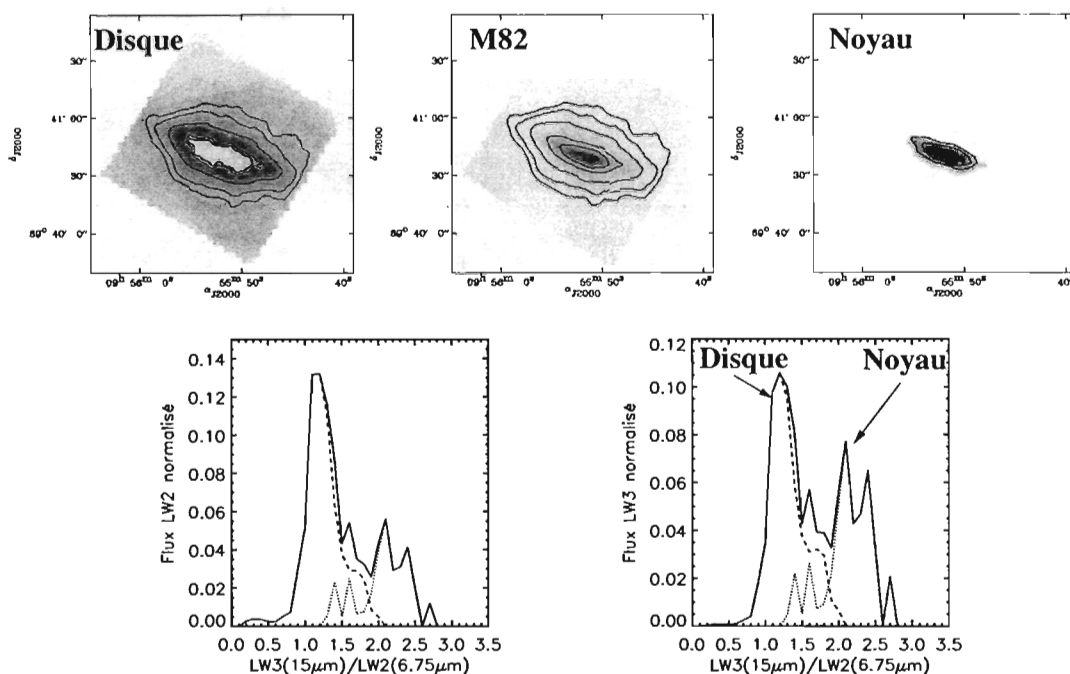


FIG. 3.6 – Variation dans M82 du rapport $LW3(12-18\mu\text{m})/LW2(5-8.5\mu\text{m})$ entre le disque et le noyau. Les deux histogrammes à gauche pour LW2 et à droite pour LW3 représentent la fraction de l'émission en fonction du rapport $LW3/LW2$. La ligne continue a été obtenue avec tous les pixels du champ d'observation. Le disque est sélectionné pour des flux par pixels inférieurs à 0.03 Jy dans la bande UIB à $7.7\mu\text{m}$. Sa distribution en intensité est représentée en trait discontinu. Pour les pixels supérieurs, on garde les régions centrales dominées par le starburst.

Dès lors que le continuum devient important, il acquiert une pente non négligeable. Sur la figure 3.7, on peut voir la variation de cette pente que nous définissons par l'indice spectral du continuum en fonction du rapport $LW3/LW2$.

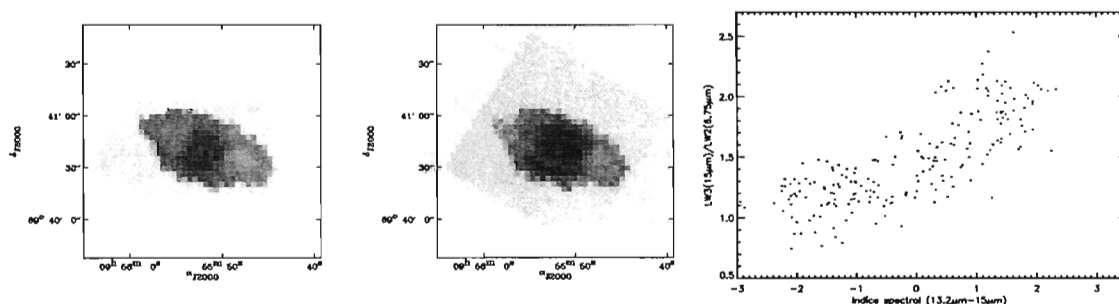


FIG. 3.7 – Variation de la pente du continuum des VSGs en fonction de $LW3/LW2$. L'augmentation du continuum par rapport aux UIBs donnée par $LW3/LW2$ est corrélée avec l'augmentation de la pente de ce même continuum. Cette pente a été estimée à partir de l'indice spectral du continuum. Cet indice α est calculé en ajustant un continuum entre 13.3 et $15\mu\text{m}$ avec la loi de puissance $F_\nu = A_0 \cdot \nu^{-\alpha}$. La carte de couleur $LW3/LW2$ (à gauche) augmente vers le centre starburst comme la carte de l'indice spectral du continuum (au milieu).

Ces deux rapports montrent clairement une corrélation avec tout de même une dispersion assez large. Nous voyons que le continuum se caractérise par une pente faible, voire même négative, pour $LW3/LW2 \sim 1$ où les UIBs à 12.7, 13.5 et 14.3 μm se superposent au continuum (voir Fig. 3.2).

L'un des intérêts majeurs du mode CVF est de fournir à la fois une information spatiale et spectrale sur un même objet durant la même observation. On peut ainsi obtenir des images sur des parties bien précises du spectre comme les raies ioniques ou les UIBs par exemple. Sur la figure 3.8, on a représenté la méthode de décomposition des UIBs exposée dans la thèse de Tran (1998) où il montre que cette méthode donne des résultats similaires à la décomposition avec des profils lorentziens développés par Boulanger et Perrault (1998).

Le rapport $\text{Continuum}(14-15 \mu\text{m})/\text{UIB}(7.7 \mu\text{m})$ similaire au rapport $LW3/LW2$, trace bien sûr lui aussi les régions les plus actives. Les cartes des raies ioniques permettent de tracer les régions les plus actives en formation d'étoiles alors que les UIBs se rencontrent

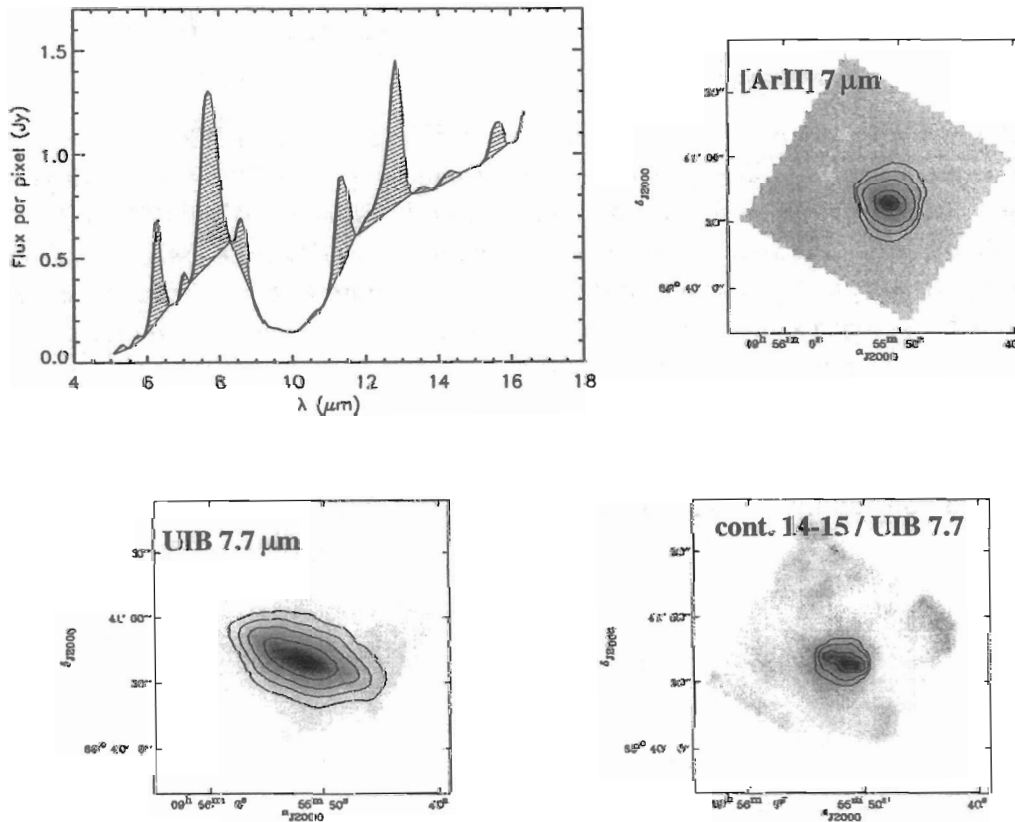


FIG. 3.8 – Méthode d'intégration des UIBs et des raies ioniques. Pour chaque UIB ou raies, on intègre dans les zones hachurées. Bien évidemment, on perd une partie du flux sous-jacent pour les UIBs, mais le flux estimé reste proportionnel au flux total dans le modèle de profils lorentziens (voir Tran, 1998 pour plus de détails). En haut à droite, la carte de la raie $[\text{ArII}]$ trace les régions les plus actives en formation d'étoiles comme celle du rapport $[\text{Continuum des VSGs}]/[\text{UIBs}]$ (en bas à droite). Pour comparaison, la carte de l'UIB à 7.7 μm est plus étendue.

partout dans la galaxie, à savoir dans les régions diffuses comme dans les régions starbursts. La carte de la raie [ArII] est peu étendue et correspond bien spatialement à la région starburst. Cette raie est parfaitement mise en évidence avec la spectroscopie fine de SWS de la figure 3.9. On peut d'ailleurs noter la présence des raies [SIV] à $10.4\,\mu\text{m}$ et H_2 à $9.7\,\mu\text{m}$ qui sont faibles ou non détectées avec ISOCAM. La raie du [NeIII] est bien résolue avec ISOCAM, mais les incertitudes dues aux problèmes d'effet de mémoire à $16\,\mu\text{m}$ rendent la mesure de son intensité extrêmement délicate.

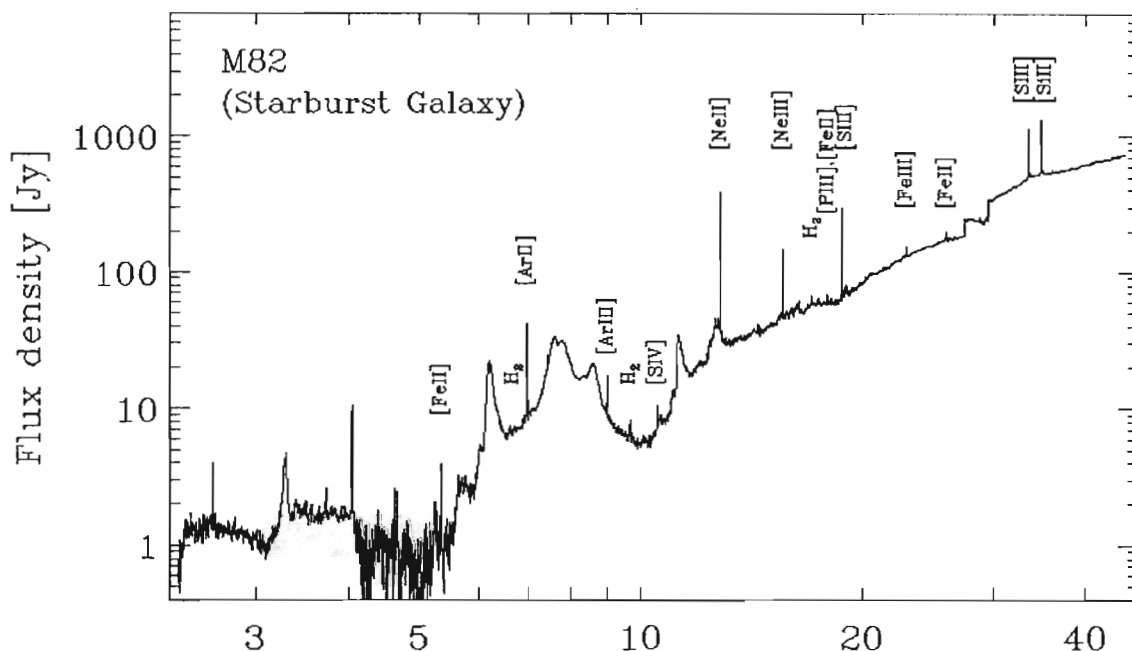


FIG. 3.9 – Spectre SWS de M 82 entre 2.5 et 45 μm (Schreiber, 1999). La haute résolution spectrale permet de séparer facilement les raies ioniques du continuum ([NeIII]) ou des UIBs ([NeII]). Certaines raies de faibles intensités sont aisément détectées telles que les raies H_2 , [ArII], [ArIII], [SIV].

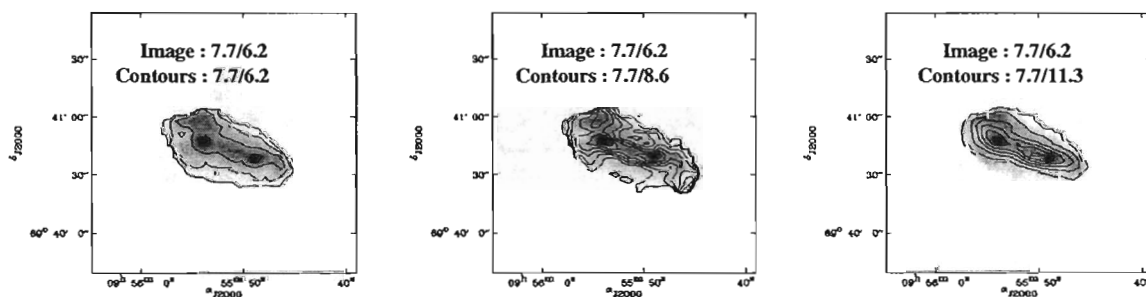


FIG. 3.10 – *Variations relatives des UIBs dans M 82. Les trois cartes sont très similaires, ce qui soutient l'hypothèse de l'extinction.*

Nous avons aussi étudié comment évoluent les rapports d'intensités des UIBs dans M 82. Cette étude peut être effectuée très facilement car elle ne nécessite pas l'utilisation d'une

haute résolution spectrale pour caractériser une partie du flux provenant de chaque UIB (voir Fig. 3.8). Nous avons déjà vu que les UIBs à 6.2, 7.7 et 8.6 μm varient très peu en forme, néanmoins on peut tout de même détecter des variations sensibles dans M 82 (voir Fig. 3.10).

Ces variations peuvent être causées soit par des variations intrinsèques des propriétés des porteurs des UIBs dues au champ de rayonnement comme la deshydrogénation (Pugget and Léger, 1989), soit par l'effet de l'absorption relative aux différentes longueurs d'onde. La bande infrarouge à 7.7 μm étant la moins affectée par la loi d'extinction, nous obtenons des rapports $\text{UIB}(7.7)/\text{UIB}(6.2)$ ou $\text{UIB}(7.7)/\text{UIB}(11.3)$ d'autant plus forts que l'extinction est importante.

Nous utiliserons par la suite la courbe d'extinction obtenue par Dudley et Wynn-Williams (1997) qui est très proche de celle de Mathis (1990) souvent citée comme référence (voir Fig. 3.11). Cependant, on trouve encore des différences non négligeables en comparant cette courbe avec celle de Draine (1989) représentée sur la figure 3.12. Des observations du centre galactique ont également montré que l'absorption entre 4 et 9 μm doit être supérieure à celle précédemment estimée (Lutz et al., 1996).

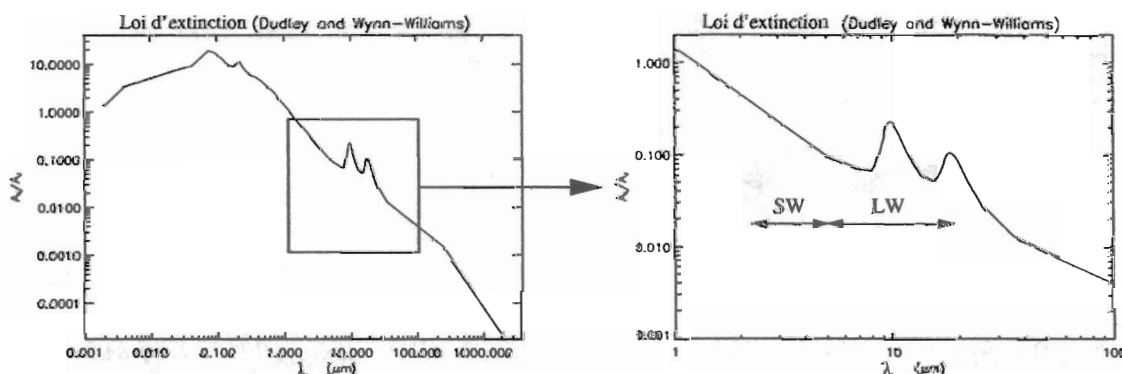


FIG. 3.11 – Loi d'extinction provenant de Dudley où l'on note la présence de l'absorption des silicates à 9.7 μm et à 18 μm .

Il est intéressant de pouvoir obtenir différents traceurs du degré d'ionisation pour pouvoir tracer les populations d'étoiles présentes dans la galaxie. Malheureusement, nous disposons seulement que de faibles raies [ArII] et [SIV]. On a vu que la raie du [NeIII] n'est pas très fiable à cause des transitoires l'affectant, et de plus la raie de [NeII] est mélangée avec l'UIB à 12.7 μm . Un moyen consiste à estimer la fraction de l'UIB dans la raie [NeII] à partir de l'UIB à 11.3 μm en supposant un rapport constant entre les deux UIBs. Cette méthode est cependant très dépendante de l'absorption qui modifie très fortement l'UIB à 11.3 μm . La carte $\text{UIB} + [\text{NeII}]$ entre 12 et 13 μm nous donne tout de même une limite supérieure à l'intensité de la raie (voir Fig. 3.13).

Les observations avec les filtres larges SW en infrarouge proche nous donnent l'information sur la composante stellaire dans M 82 qui n'est pas accessible avec les spectres CVF de 5 à 16 μm (voir Fig 3.14). Le continuum contient une contribution stellaire plus importante par rapport à celle due aux poussières qui émettent relativement peu dans l'infrarouge proche en comparaison avec leur émission de 5 à 16 μm . A ces longueurs d'onde, la composante stellaire définissant le centre dynamique en bande K pourrait

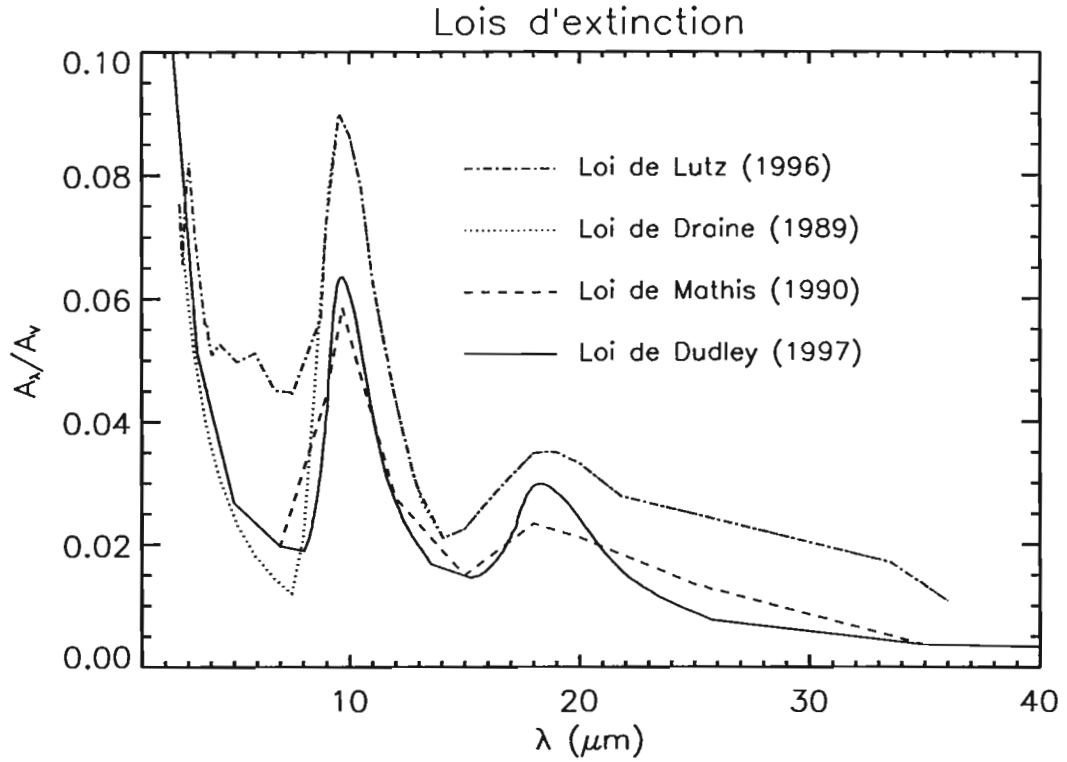


FIG. 3.12 – Les différentes lois d'extinction obtenues par Draine (1989), Lutz et al. (1996), Dudley and Wynn-Williams (1997) et Mathis (1990).

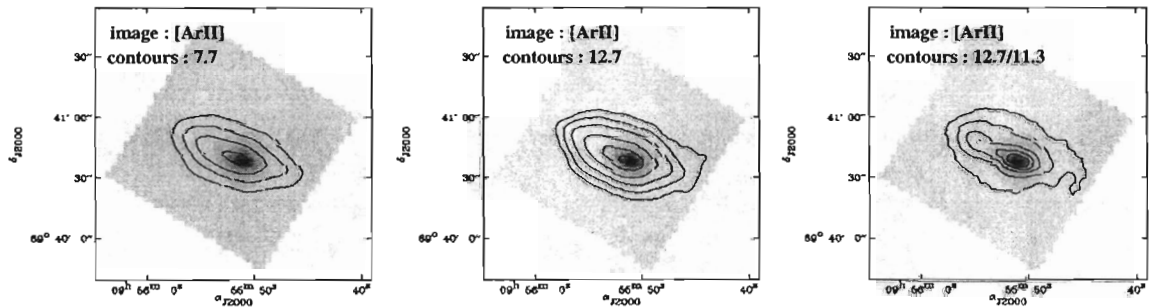


FIG. 3.13 – Carte de l'UIB(12.7 μm) avec la raie [NeII](12.8 μm) dans M82. A gauche: Carte de l'UIB(7.7 μm) montrant la répartition spatiale des UIBs. Au milieu, la carte intégrée entre 11.7 et 13.3 μm inclue l'émission de la [NeII] en plus de l'UIB à 12.7 μm et à 12 μm . Cette carte est fortement contaminée par les UIBs. En normalisant celle-ci par l'UIB à 11.3 μm ont fait apparaître un pic centré sur celui de la raie [ArII] où la raie du [NeII] doit également provenir essentiellement. Une plus forte absorption associée avec les régions starbursts pourrait aussi être responsable de l'augmentation du rapport en diminuant la bande à 11.3 μm .

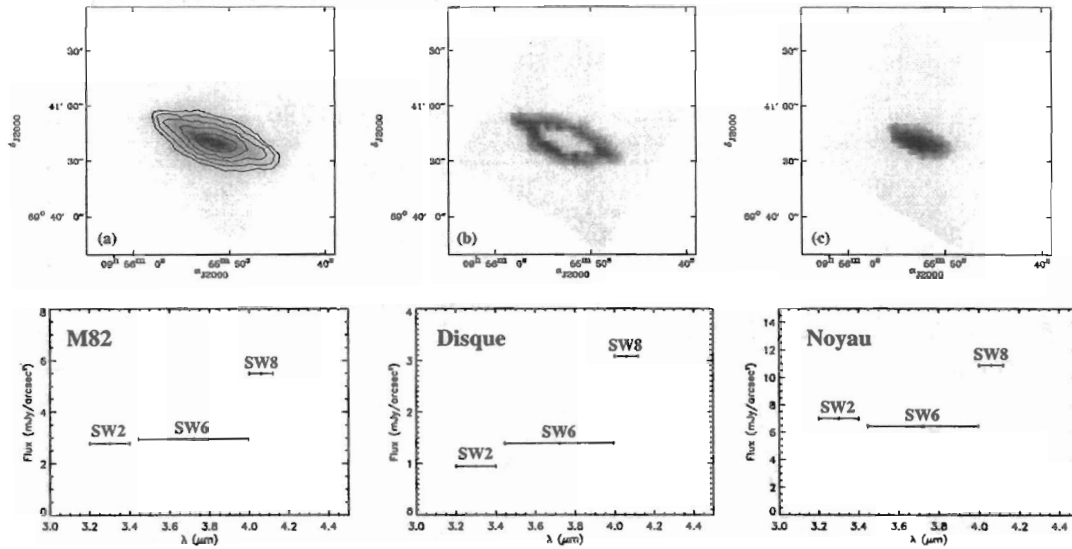


FIG. 3.14 – Observations ISOCAM avec les filtres SW dans l'infrarouge proche à 3-4 μm . (a): Carte LW2(5-8.5 μm) synthétisée à partir du CVF avec les contours du filtre SW6(3.5-4 μm). En (b), on a représenté les régions définies pour caractériser les régions du disque. En (c), on a la SED des régions starbursts centrales de M82.

contribuer à l'augmentation du continuum dans la SED des régions centrales (Schreiber, 1999 pour une étude détaillée dans l'infrarouge). Il en résulte une diminution de la largeur équivalente de la raie Br α à 4.05 μm dans les régions centrales. L'ensemble de ces observations montrent qu'il est nécessaire d'observer au delà de 13 μm pour estimer à partir des propriétés du spectre la contribution du continuum des VSGs associé aux régions HII.

3.2.2 NGC 253 : La galaxie starburst de l'hémisphère sud

La luminosité de la galaxie starburst NGC 253 est comparable à celle de M82 avec $L_{\text{IR}} \sim 2.8 \times 10^{10} L_{\odot}$ (Telesco, 1988). La région starburst est localisée dans quelques centaines de parsecs au centre de la galaxie. Cette galaxie possède une barre accompagnée d'un anneau circum-nucléaire (Engelbracht et al., 1998). Des bandes denses de poussière causées par une interaction ainsi qu'une efficacité de formation d'étoiles importante font de cette galaxie un prototype de galaxie starburst similaire à M82. L'observation avec ISOCAM faite à 1.5''/pixel nous donne la meilleure résolution spatiale de la caméra limitée par la diffraction (4''-5'') et nous permet de sonder le starburst central dans une région de 45'' centrée sur la galaxie. Sur la figure 3.15, on peut voir que le champ d'observation d'ISOCAM est suffisant pour couvrir la majeure partie de la région starburst centrale.

Cette galaxie possède des propriétés spectrales très similaires à celles de M82. Le rapport LW3/LW2 augmente dans la région centrale de la galaxie pour atteindre des valeurs encore plus extrêmes que celles de M82. Dans la figure 3.16, le rapport atteint même des valeurs supérieures à 4 vers le centre. Ces rapports élevés se caractérisent par

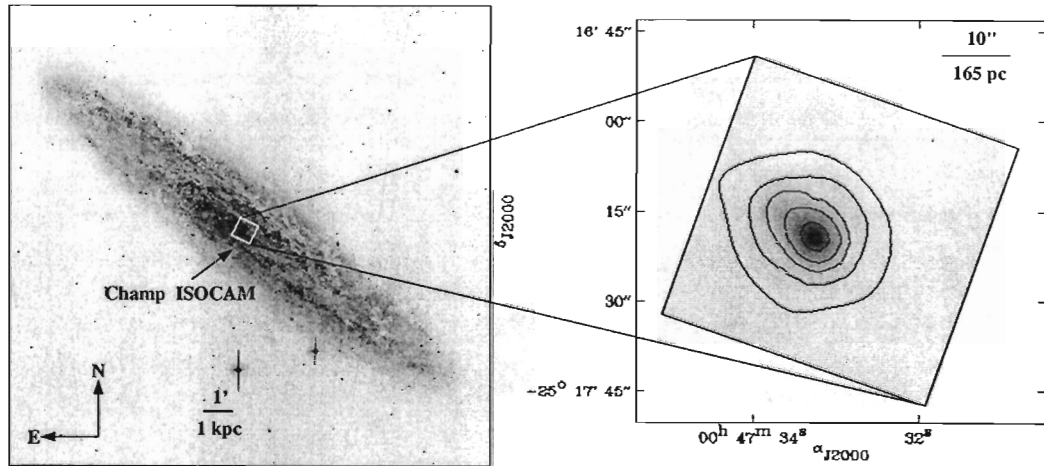


FIG. 3.15 – La galaxie NGC 253 en optique (à gauche) et en infrarouge moyen (à droite) entre 12 et 16 μm .

un très fort continuum des VSGs avec une pente encore plus élevée (voir Fig. 3.17). Dans ce cas également, le continuum des VSGs ne semblent pas contribuer au flux à courtes longueurs d'onde en-dessous des UIBs à 6.2, 7.7 et 8.6 μm . On peut même simuler la diversité spectrale observée en faisant varier uniquement le continuum des VSGs avec une émission des UIBs constante (voir Fig. 3.18).

Bien que le modèle du corps noir pour rendre compte du continuum ne soit pas approprié pour les VSGs en régime transitoire hors équilibre thermodynamique, il permet tout de même d'ajuster proprement le continuum jusqu'à 16 μm . On peut expliquer l'augmentation de la pente du continuum entre 13-15 μm par une remontée en intensité de ce même continuum ($T \sim 200$ K) par rapport aux UIBs à 12.7, 13.5 et 14.3 μm .

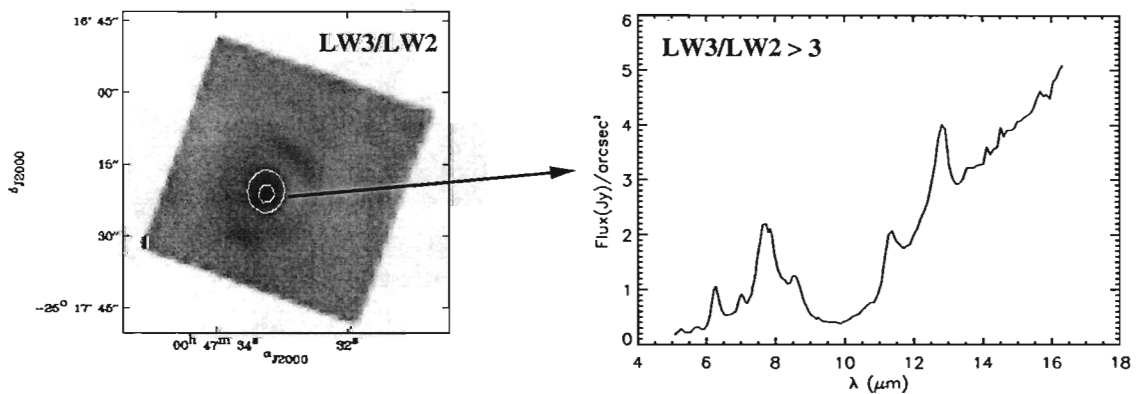


FIG. 3.16 – A gauche: Carte $LW3(12-18\mu\text{m})/LW2(5-8.5\mu\text{m})$ de NGC 253. A droite: spectre des régions montrant un rapport $LW3/LW2 > 3$. On peut noter que la raie du [NeIII] est très faible comparée à celle observée dans le noyau de M82.

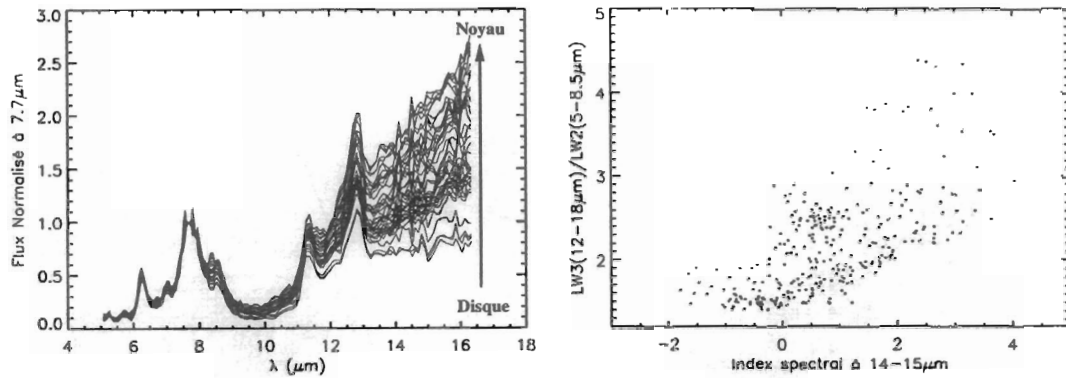


FIG. 3.17 – Variabilité spectrale dans NGC 253. À droite, l'ensemble des spectres ont été normalisés au sommet de la bande infrarouge à $7.7\mu\text{m}$ pour montrer la très grande stabilité des UIBs entre 5 et $10\mu\text{m}$.

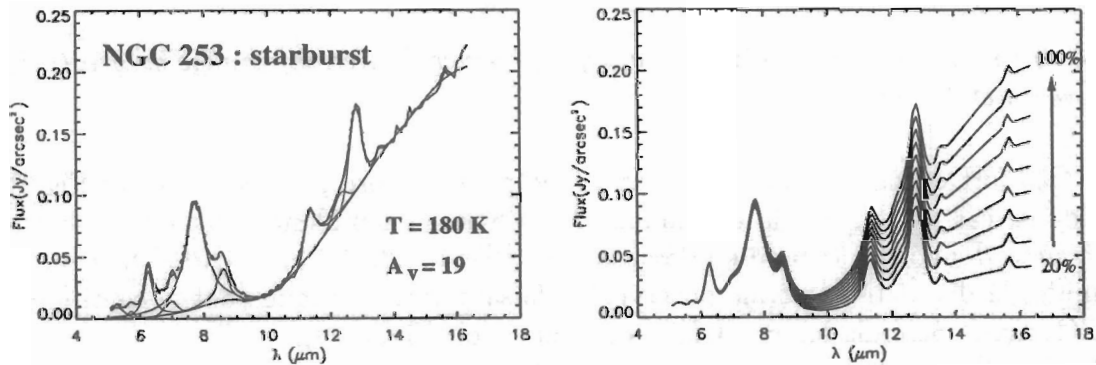


FIG. 3.18 – Décomposition spectrale en UIBs+Continuum. Sur la figure de gauche, on a utilisé la même méthode de décomposition que pour M 82 (voir Fig. 3.2). La contribution du continuum est faible sous les UIBs entre 5 et $9\mu\text{m}$. À partir de ce spectre, on a fait varier l'intensité du continuum de 20% jusqu'à 100% ce qui nous permet de retrouver l'ensemble des spectres du disque jusqu'au noyau starburst (voir Fig. 3.17).

3.3 Une galaxie starburst extrême: II Zw 40

La galaxie naine bleue compacte II Zw 40 est une galaxie starburst située à une distance de 10.5 Mpc (Wynn-williams and Becklin, 1986). Elle est caractérisée par de fortes raies en émission, un continuum bleu et une faible métallicité indiquant un taux actuel de formation d'étoiles plus important que celui intégré durant tout le passé de la galaxie (Joy and Lester, 1988).

Dans cette galaxie, le spectre en infrarouge moyen est clairement dominé par le continuum des VSGs (Madden et al., 1999a, voir Fig. 3.19). Les UIBs ne sont pas détectées, ce qui pourrait être dû à une destruction de leurs porteurs par l'intense champ de rayonnement provenant des régions HII de la galaxie. Ce spectre est très similaire à celui d'une région HII comme M 17 (voir Fig. 2.3) où les UIBs extrêmement faibles sont probablement détruits par le champ de rayonnement provenant des étoiles OB. La

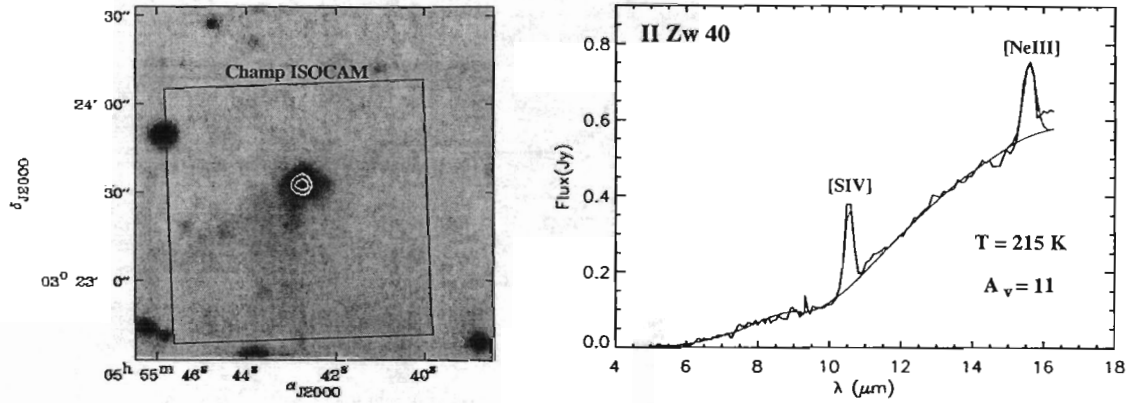


FIG. 3.19 – Spectre ISOCAM de II Zw 40 obtenue par Madden et al. (1999). A droite, la carte optique (DSS) de la galaxie naine bleue avec des contours pour le filtre LW3 estimé à partir du CVF. Aucune émission étendue est détectée. Un continuum de corps noir a été ajusté au continuum de poussière ($T=215\text{K}$, $A_V=11$).

non détection des UIBs pourraient aussi s'expliquer en partie par la faible métallicité observée dans cette galaxie (Madden et al., 1999a). Il reste néanmoins que l'absence d'UIBs est clairement observée dans cette galaxie dominée uniquement par des régions de formation d'étoiles. Par contre, le continuum associé aux VSGs se caractérise toujours dans notre échantillon de galaxies starbursts par une forme de corps noir aux alentours de $T=200\text{K}$. Ce continuum caractérisant les régions de formation d'étoiles contribue ainsi essentiellement à l'émission infrarouge au delà de $10\mu\text{m}$.

Nous avons vu que les starbursts comme M 82 possèdent l'ensemble des raies ioniques à potentiels d'ionisation faibles ([ArII], [NeII], [ArIII]) et moyens ([SIV], [NeIII])² (voir Fig. 3.1). Dans le cas de II Zw 40, les seules raies ioniques [SIV] et [NeIII] détectées tracent ainsi un champ de rayonnement UV très intense.

TAB. 3.1 – Potentiels d'ionisation des raies observées entre 5 et $16\mu\text{m}$.

Eléments	Potentiel d'ionisation (eV)	λ μm
[ArII]	15.76	6.99
[NeII]	21.56	12.81
[ArIII]	27.63	8.99
[SIV]	34.83	10.51
[NeIII]	40.96	15.55
[NeV]	126.21	14.32
[NeVI]	157.93	7.65

2. Nous verrons par la suite que les raies du [NeV] et du [NeVI] se rencontrent dans des environnements produisant un champ de rayonnement UV-X intense comme dans les AGNs

L'étude d'objet proche et très intense en formation d'étoiles nous a permis de définir l'ensemble des propriétés des spectres en infrarouge moyen entre 5 et 16 μm . Un résumé de ces caractéristiques est exposé au travers de la figure 3.20.

Après avoir étudié l'émission dans l'infrarouge moyen des starbursts, nous allons dans le chapitre suivant aborder l'émission associée aux noyaux actifs de galaxies ("AGNs").

LES RÉGIONS DE FORMATION D'ÉTOILES OBSERVÉES PAR ISOCAM

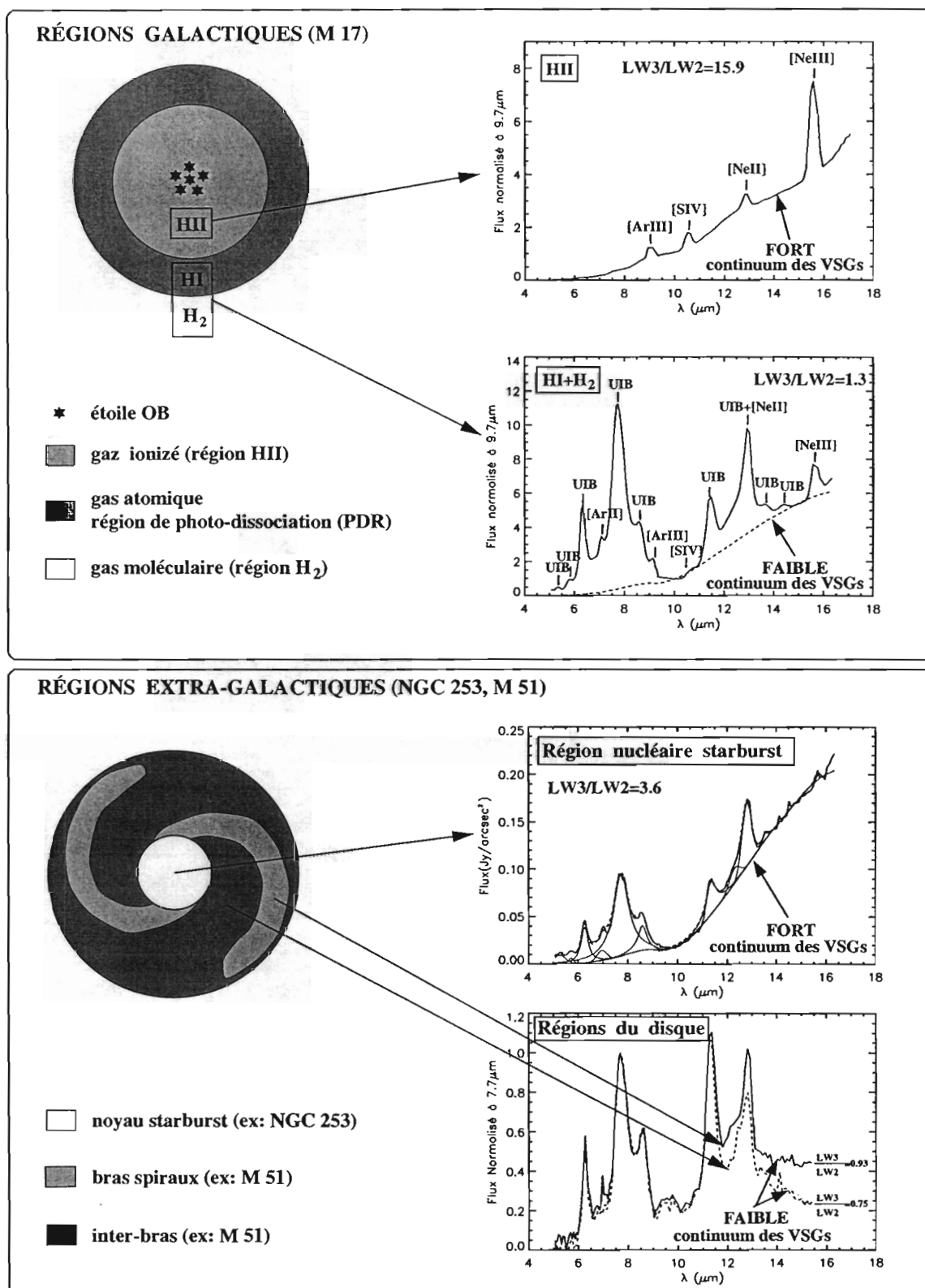


FIG. 3.20 – Les régions de formation d'étoiles dans l'infrarouge moyen.

Chapitre 4

Les galaxies avec un noyau actif

Sommaire

4.1	Introduction	45
4.2	Le modèle standard des noyaux actifs de galaxies	46
4.3	Le prototype de Seyfert 2 : NGC 1068	50
4.4	Le prototype de radio galaxie : CENTAURUS A	58
4.5	Article: "A barred spiral at the centre of the giant elliptical radio galaxy Centaurus A"	63

4.1 Introduction

Nous avons jusqu'à présent étudié l'émission de la poussière chauffée uniquement par le rayonnement interstellaire provenant des étoiles environnantes. Ce type d'émission composée essentiellement d'un continuum venant des VSGs et des UIBs se rencontrent dans la plupart des galaxies dominées par la formation d'étoiles. Néanmoins, les étoiles ne représentent pas l'unique source d'énergie responsable du chauffage des poussières. En effet, il existe dans certaines galaxies un mécanisme très énergétique capable de produire un champ de rayonnement intense permettant de chauffer la poussière. Ce chapitre va ainsi être consacré à l'étude de l'émission en infrarouge moyen résultant de cette source d'énergie au cœur des galaxies, décrite sous le terme noyau actif de galaxies¹.

La première étude impliquant des noyaux actifs de galaxies fut initiée par Fath en 1909 qui trouva des raies intenses vues en émission dans les spectres optiques des galaxies les plus lumineuses. Les études suivantes permirent, grâce à l'amélioration de la qualité des spectres, la découverte d'autres galaxies à fortes raies d'émission telles que NGC 1068, NGC 4051 ou NGC 4151 (Slipher, 1917; Hubble, 1926). Ces galaxies font d'ailleurs encore partie des prototypes les plus étudiés de par leur proximité. En 1943, Carl Seyfert découvrit qu'une partie de la population des galaxies spirales montraient des spectres d'émission possédant des raies larges (Seyfert, 1943). L'avènement de la

1. "Active Galactic Nucleus" ou "AGN" en anglais

radio astronomie dans les années 50 permit la découverte des radio-sources telles que Cygnus A (Baade and Minkowski, 1954). En 1963, les sources quasi-stellaires, aussi appelées quasars, furent identifiées comme étant des galaxies très lointaines exhibant un spectre décalé vers le rouge en raison de l'expansion de l'univers (Schmidt, 1963). Les débuts de l'aire spatiale ouvrirent de nouvelles fenêtres d'observation jusque là inaccessibles au sol (X, Ultraviolet, infrarouge), ce qui permit d'observer l'émission des galaxies actives sur l'ensemble du spectre électromagnétique.

Ce chapitre commence par l'introduction du modèle standard des AGNs. Nous inclurons ensuite dans ce schéma général les observations ISOCAM de NGC 1068 suivie d'une partie sur la plus proche radio galaxie, Centaurus A. On utilisera les données ISOCAM de ces deux objets comparées à l'ensemble des autres longueurs d'onde pour fixer les propriétés générales des AGNs dans l'infrarouge moyen. Nous terminerons par une revue des résultats déduits de ces observations.

4.2 Le modèle standard des noyaux actifs de galaxies

Les modèles standards des AGNs impliquent la présence d'un trou noir massif ($M \sim 10^6 - 10^9 M_\odot$, Rayon $\sim 10^{-7} - 10^{-4}$ pc). Cet objet compact au centre de la galaxie va, par l'intermédiaire de son intense champ gravitationnel, attirer la matière environnante en formant un disque d'accrétion (Rayon $\sim 10^{-4} - 10^{-1}$ pc). Les forces de viscosité présentes dans le disque et permettant à la matière de tomber vers le trou noir vont chauffer le disque ($T \sim 10^5$ K). Une grande partie de l'énergie de rotation de la matière se retrouve rayonnée dans l'UV et les rayons X (voir pour une revue Rees, 1984). A l'échelle du parsec, des nuages à hautes vitesses ($\sim 10^3 - 10^4$ km s $^{-1}$) produisent des raies d'émission larges par effet Doppler². Au delà du parsec, on observe des régions ionisées responsables des raies d'émission étroites³.

De façon observationnelle, les galaxies actives ont été classées en deux catégories en fonction de la largeur de leurs raies d'émission (voir pour une revue Antonucci, 1993): Seyfert 1 avec des raies permises larges et des raies interdites étroites, Seyfert 2 avec des raies permises et interdites étroites. La découverte en lumière polarisée de régions de raies larges et d'un continuum non-stellaire dans la galaxie Seyfert 2 NGC 1068 a conduit au schéma unifié actuel (Antonucci and Miller, 1985). Les auteurs ont suggéré l'existence d'un disque ou d'un tore optiquement épais capable d'obscurcir les régions centrales émettant les raies larges dans les Seyferts 2 (voir Fig. 4.1). Néanmoins, le rayonnement provenant de la BLR peut être diffusé et donc polarisé par les électrons ou la poussière se trouvant au-dessus et en-dessous des pôles du tore.

Nous avons décrit jusqu'à présent les différents éléments composants un AGN, ce qui va nous permettre d'aborder l'émission associée à chacune de ces régions. Le spectre d'un AGN peut se décomposer en plusieurs composantes, chacune étant le résultat de processus physiques différents. On peut séparer ces composantes en deux types, d'une part l'émission directement produite par l'AGN (rayonnement primaire) et, d'autre part

2. Région de raies larges ou "Broad Line Region", "BLR" en anglais

3. Région de raies étroites ou "Narrow Line Region", "NLR" en anglais

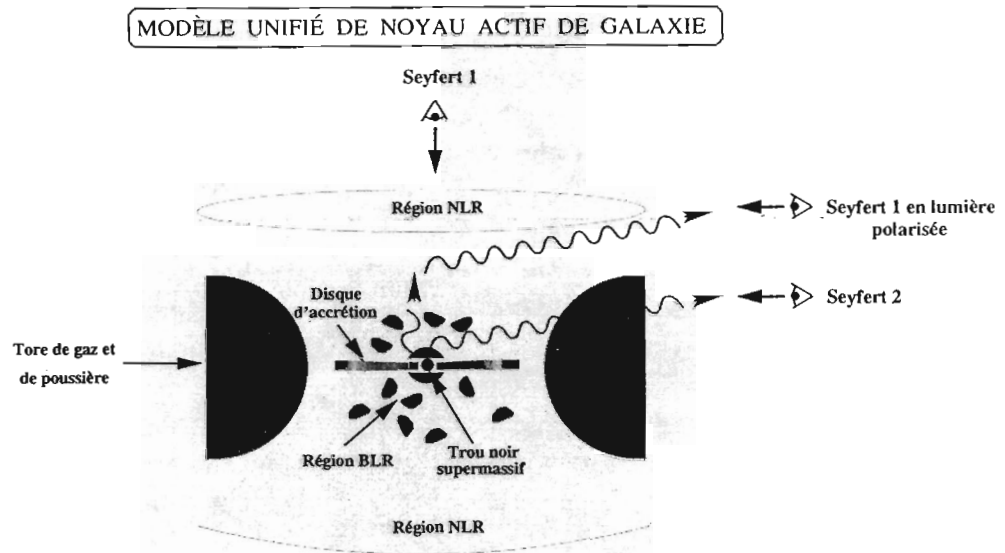


FIG. 4.1 – *Modèle standard des noyaux actifs de galaxies ("AGNs"). Les échelles spatiales ne sont pas respectées (voir texte pour plus de détails).*

l'émission résultant d'une transformation du rayonnement direct via une interaction avec l'environnement (rayonnement secondaire). On verra par la suite que ces deux types de rayonnement peuvent être observés dans l'infrarouge moyen par ISOCAM.

Le rayonnement primaire

Le rayonnement primaire produit par l'AGN a une composante non-thermique, le rayonnement synchrotron caractérisé par une loi de puissance. Une partie de l'émission provient également d'un rayonnement thermique caractérisé par une loi de corps noir à très haute température ($T \sim 30000$ K) avec un pic d'émissivité dans l'ultraviolet à $0.15 \mu\text{m}$.

1. Le rayonnement non-thermique.

Ce type d'émission est produit par des particules accélérées par l'intermédiaire d'un champ magnétique. Ce mécanisme se nomme rayonnement synchrotron (pour des particules relativistes) ou rayonnement cyclotron (pour des particules non relativistes). La loi d'émission peut s'exprimer sous la forme d'une loi de puissance ($F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ avec un index spectral $\alpha \sim 1$) en prenant une distribution spectrale d'énergie en loi de puissance pour les particules accélérées (Rybicki and Lightman, 1979). L'émission synchrotron augmente par conséquent pour les grandes longueurs d'ondes (radio) où elle devient prédominante vis à vis de l'émission thermique observée à plus courtes longueurs d'onde (infrarouge, optique). Cette composante synchrotron est observable dans tous les spectres de galaxies. Les particules accélérées peuvent être produites soit par l'explosion de supernovae dans les régions de formation d'étoiles soit dans l'environnement de l'AGN. Un type particulier d'AGN appelé blazar (objets BL Lac, quasars violemment

variables en optique) se caractérise essentiellement par un spectre synchrotron avec un continuum optique/infrarouge proche d'une loi de puissance. La forte polarisation ainsi que la rapide variabilité observée de cette émission peuvent provenir du jet relativiste produit par l'AGN (Blandford and Königl, 1979). Les blazars ne représentent qu'une faible fraction des AGNs. D'autres processus physiques, Compton-inverse ou l'annihilation de paires électron-positrons, contribuent à l'émission γ et X. Dans l'infrarouge moyen, il est assez rare de pouvoir observer du rayonnement non-thermique sans être dominé par l'émission de la poussière. Néanmoins, le rayonnement synchrotron associé au jet de M 87 a été clairement détecté par ISOCAM (Madden, communication privée).

2. Le rayonnement thermique : l'excès UV.

Le noyau actif produit un rayonnement primaire pouvant être produit par le disque d'accrétion entourant le trou noir super-massif (modèle standard). Ce rayonnement produit un excès dans l'ultraviolet ($\sim 0.1 \mu\text{m}$) ainsi que dans les X mous ($\sim 1 \text{ keV}$). Ce type de rayonnement est complètement dominé par les processus de réémission par la poussière dans le domaine d'ISOCAM.

Le rayonnement secondaire

Il est associé à un continuum de poussières très chaudes proches de leurs températures d'évaporation ($T \sim 1000\text{-}1500 \text{ K}$ pour les graphites, $T \sim 1000 \text{ K}$ pour les silicates) avec un pic d'émissivité dans l'infrarouge à $3 \mu\text{m}$.

1. L'excès dans le continuum en proche infrarouge.

Beaucoup de quasars ou d'AGNs montrent un excès d'émission du continuum dans l'infrarouge proche avec un pic à $3 \mu\text{m}$. Cet excès d'émission est probablement émis par de la poussière chauffée par le rayonnement optique/ultraviolet provenant directement de l'AGN. Ainsi, par l'intermédiaire de la poussière, une partie de l'émission primaire très énergétique (optique-UV) émise par l'AGN est transformée en émission secondaire moins énergétique ($2\text{-}5 \mu\text{m}$) de façon similaire aux régions de formation d'étoiles, à ceci près que les poussières sont chauffées à des températures plus importantes dans le cas de l'AGN (Barvainis, 1987). D'après les modèles (Pier and Krolik, 1992; Efstathiou and Rowan-Robinson, 1994; Granato et al., 1987), cet excès commence à être visible aux environs de $2 \mu\text{m}$, puisque cette longueur d'onde correspond au pic d'émission des grains de graphite chauffés à leur température d'évaporation. Selon les différents modèles de poussière proposés, les grains de poussière sont constitués de graphite ou de silicate. Cependant, les graphites ont une température d'évaporation supérieure ($\sim 1500 \text{ K}$) à celle des silicates ($\sim 1000 \text{ K}$) et par conséquent peuvent émettre à de plus courtes longueurs d'onde. Les grains de poussière chauffés à la température d'évaporation se trouvent environ à une distance typique de 1 pc du trou noir super-massif, c'est le rayon d'évaporation. Au-delà, la température diminue et en-dessous de cette distance, les grains de graphite sont vaporisés, ne permettant pas à la poussière d'exister. Ainsi, l'émission au delà $2 \mu\text{m}$ est produite par des grains de moins en moins chauds au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre.

Le quasar prototype 3C 273 présente un excès dans le proche infrarouge s'étendant

de 2 à $10\ \mu\text{m}$ bien que l'émission optique/ultraviolet provenant de l'AGN domine la luminosité totale. D'un autre côté, il existe des quasars plus obscurcis par leur contenu en poussière et dominés par l'émission infrarouge comme IRAS 13349+2438. Dans ce type d'objet, l'excès infrarouge proche couvre un intervalle spectral plus grand de 1 à $60\ \mu\text{m}$ avec un pic à $8\ \mu\text{m}$. Cette émission étendue spatialement nécessite une plus grande dispersion de températures et par conséquent une plus grande quantité de poussières distribuées sur de plus grandes distances par rapport à l'AGN. Ces deux quasars peuvent servir pour définir deux classes distinctes, d'une part les quasars contenant peu de poussières (3C 273), et d'autre part ceux obscurcis par une grande quantité de poussières (IRAS 13349+2438). L'émission thermique associée à la poussière présente un spectre ne s'étendant pas au-delà de $60\ \mu\text{m}$. En général, les UIBs ne sont pas présentes dans les spectres de Seyfert 1 et de quasars. Les modèles proposés excluent l'existence des molécules aromatiques responsables des UIBs près de l'AGN, qui seraient rapidement détruites par le rayonnement UV-X. Ce domaine spectral entre 2 et $10\ \mu\text{m}$ accessible avec ISOCAM devrait nous permettre d'avoir la distribution d'énergie de la poussière très chaude associée à l'AGN.

2. Emission dans l'infrarouge moyen et dans l'infrarouge lointain.

Ce domaine de longueur d'onde est d'un très grand intérêt pour l'étude des AGNs où l'émission bolométrique provient essentiellement de l'infrarouge (Spinoglio et al., 1995). L'émission infrarouge dans le domaine IRAS peut se décomposer en trois classes (Pérez García et al., 1998).

- Une composante tiède ($\sim 150\text{K}$) qui provient de la poussière proche du noyau actif.
- Une composante froide ($\sim 40\text{-}50\text{K}$) qui est due à de la poussière chauffée dans des régions de formation d'étoiles.
- Une composante très froide ($\sim 10\text{-}20\text{K}$) qui résulte de l'émission de la poussière chauffée par le champ de rayonnement interstellaire.

L'émission en infrarouge moyen ($\sim 10\text{-}20\ \mu\text{m}$) provient de la région compacte nucléaire observée en optique alors que l'émission en infrarouge lointain ($\sim 100\ \mu\text{m}$) est corrélée avec l'émission optique du disque galactique (Rodríguez Espinosa et al., 1987). De plus, pour beaucoup de galaxies de Seyfert, la luminosité du continuum optique-UV provenant directement de l'AGN n'est pas suffisante pour être responsable de l'émission dans l'infrarouge lointain via la réémission par les poussières (Rodríguez Espinosa et al., 1986). On peut ainsi dresser un schéma montrant la nature composite de l'émission dans l'infrarouge moyen (région : noyau actif, nature : émission de la poussière chaude) et dans l'infrarouge lointain (région : extra-nucléaire et disque, nature : émission de la poussière froide). Par conséquent, l'observation dans l'infrarouge lointain ($60\text{-}100\ \mu\text{m}$) avec une mauvaise résolution spatiale ($\sim 1'$) ne permet pas de distinguer les galaxies à flambées d'étoiles des galaxies actives (Seyfert). Cette difficulté est aussi renforcée par le fait que les galaxies à noyau actif présentent souvent des régions circum-nucléaires à flambées d'étoiles (ex: NGC 1068). ISOCAM devrait être sensible entre 3 et $16\ \mu\text{m}$ à de

la poussière en émission présentant un large gradient de températures (100 K jusqu'à 1000 K).

La section suivante est dédiée à l'étude en particulier du prototype de Seyfert 2, NGC 1068. Cette étude va nous permettre d'étudier l'émission de la poussière chauffée non pas par les étoiles mais par l'AGN lui-même. L'étude de la galaxie elliptique Centaurus A sera abordée dans la dernière partie de ce chapitre.

4.3 Le prototype de Seyfert 2 : NGC 1068

Située à la distance de 14 Mpc ($70 \text{ pc.arcsec}^{-1}$ en supposant $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$), NGC 1068 représente le plus proche exemple de galaxie Seyfert 2. Sa luminosité bolométrique est conséquente avec $L = 3 \times 10^{11} L_\odot$ (Telesco et al., 1984). Cette galaxie présente, tout comme M 82 et NGC 253, une barre stellaire observée à $2.2 \mu\text{m}$ s'étendant jusqu'à une distance de 1.1 kpc du noyau (Scoville et al., 1988). Cette barre se termine par des bras spiraux où se produit une forte activité de formation d'étoiles à 1 kpc autour de la région nucléaire (Tacconi et al., 1994; Helfer and Blitz, 1995). Cet objet présente ainsi les conditions idéales pour l'observation avec ISOCAM. On va être capable d'utiliser le pouvoir de résolution spatiale de l'instrument ($5''$ - $6''$) pour séparer la composante starburst de l'AGN⁴.

La galaxie NGC 1068 a été observée en mode CVF entre 5 et $16 \mu\text{m}$ ainsi que dans l'infrarouge proche à 3 - $4 \mu\text{m}$. On va ainsi pouvoir étudier l'émission de la région centrale dominée par l'AGN incluant également les régions associées telles que le cône d'ionisation et le tore moléculaire (Cameron et al., 1993; Rouan et al., 1998; Bock et al., 1998). Sur la figure 4.2, nous avons rassemblé l'ensemble des observations ISOCAM obtenues dans le mode spectro-imagerie entre 5 et $16 \mu\text{m}$. En utilisant différentes ouvertures pour l'intégration du flux, nous avons séparé spatialement la région centrale, ponctuelle à la résolution d'ISOCAM, des régions extra-nucléaires de formation d'étoiles présentes dans les bras spiraux. Nous remarquons immédiatement la grande différence spectrale de l'émission en infrarouge moyen pour des régions dominées soit par l'AGN soit par l'activité de formation d'étoiles.

Ces propriétés spectrales se résument ainsi:

- Les bandes infrarouges ou UIBs observées dans les spectres starbursts sont très faibles voir non-détectées dans l'AGN. Cette absence des UIBs n'est pas due à un effet de dilution causé par l'addition d'un continuum qui de ce fait pourrait diminuer le contraste des bandes. On peut mettre en évidence leur diminution intrinsèque à partir des cartes intégrant uniquement le flux provenant des bandes (6.2 , 7.7 , 8.6 , $11.3 \mu\text{m}$) sans prendre en compte le continuum. La carte de l'UIB à $7.7 \mu\text{m}$ en bas à droite de la figure 4.2 montre clairement que sa contribution est négligeable au centre de la galaxie dominée par l'AGN. Cette technique permet de plus de "filtrer" la très forte composante AGN qui domine l'émission globale. La non-détection des UIBs dans l'AGN est bien sûr limi-

4. Ce terme est utilisé ici pour désigner l'ensemble des composants du modèle unifié non résolues spatialement avec ISOCAM et pas uniquement la région centrale de quelques parsecs.

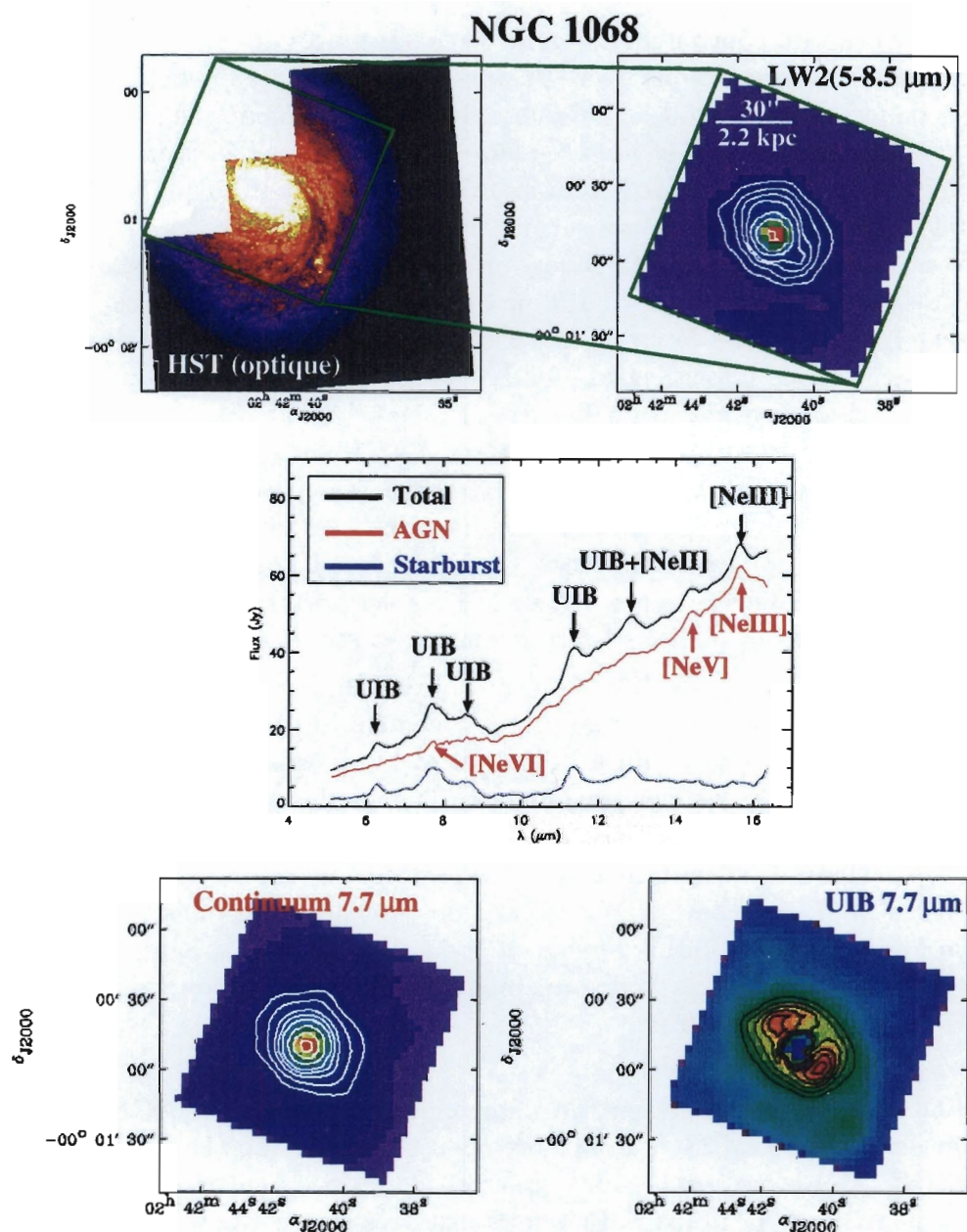


FIG. 4.2 – Observation ISOCAM en mode CVF de NGC 1068. En haut à gauche: Image HST en optique (WFPC2, 660 nm) avec le champ ISOCAM centré sur la région centrale. En haut à droite: Carte ISOCAM intégrée entre 5 et 8.5 μm (LW2). Au milieu: Spectres ISOCAM de la galaxie (trait noir, Diamètre = 40"), de la région centrale dominée par l'AGN (trait rouge, Diamètre = 9"), de la région du disque (trait bleu, différence entre les deux contributions). Les UIBs ainsi que les raies du [NeII] et [NeIII] caractérisant les régions de formation d'étoiles sont détectées sur le spectre global. Les raies du [NeVI], [NeV] et du [NeIII] en rouge tracent aussi la présence d'un AGN. A noter que la raie du [NeIII] (provenant essentiellement de l'AGN dans NGC 1068) se rencontre à la fois dans les régions HII et dans les AGNs. En bas: carte de l'UIB à 7.7 μm (à droite) avec celle de son continuum (à gauche).

tée par le signal sur bruit du continuum et donne de ce fait plutôt une limite supérieure. Néanmoins, on montre clairement que les UIBs proviennent essentiellement des régions extra-nucléaires de formation d'étoiles bien que celles-ci ne dominent pas l'émission en infrarouge moyen. Schulz et al. (1998) ont également montré que l'émission des UIBs n'est pas corrélée avec la luminosité de l'AGN en utilisant un échantillon de Seyfert 1 et 2 observé avec ISOPHOT-S. En d'autres termes, les AGNs contribuent uniquement à l'émission du continuum aux courtes longueurs en dominant l'émission dans les AGNs non obscurcis (Seyfert 1) alors que les UIBs provenant du disque sont aussi intenses dans les Seyferts 1 que dans les Seyferts 2. La diminution des UIBs dans les AGNs avaient déjà été mentionnée (Roche et al., 1991; Genzel et al., 1998a). Cependant, à cause du faible échantillonnage spectral (pour des observations au sol) ou d'une moins bonne résolution spatiale, il restait difficile de séparer l'AGN des régions starbursts périphériques. L'absence des UIBs s'explique par la destruction probable des molécules responsables de leur émission par l'intense champ rayonnement UV-X au voisinage de l'AGN (Léger et al., 1989; Allain et al., 1996). Le manque d'UIBs dans les AGNs est comparable à celui observé dans la région HII de M 17 où les porteurs des UIBs peuvent également être détruits par les photons UV provenant des étoiles OBs (voir Fig.2.3).

- Le continuum à courtes longueurs d'onde est relativement important dans le spectre de l'AGN. Il contribue entre 5 et $10\ \mu\text{m}$ à $\sim 50\%$ de la luminosité intégrée sur tout le spectre CVF à la différence des régions starbursts où la contribution du continuum des VSGs est négligeable en-dessous des UIBs à 6.2, 7.7 et $8.6\ \mu\text{m}$. Dans le spectre AGN de NGC 1068, ce continuum est nettement plus important que celui observé dans des régions HII comme M 17 ou IIZw40. La présence de ce continuum dans l'infrarouge proche à 3-5 μm (voir aussi Fig. 4.3) nécessite une poussière chauffée à haute température (500-1000 K) que seul le champ de rayonnement UV-X de l'AGN pourrait produire (Barvainis, 1987; Laurent et al., 1999).

- Certaines raies d'émission permettent de détecter la présence d'un AGN ([NeV], [NeVI] dans l'intervalle spectral ISOCAM). Ces raies observées dans les galaxies proviennent des AGNs (Moorwood et al., 1996; Lutz et al., 1998b; Genzel et al., 1998a), néanmoins elles nécessitent la plupart du temps une très haute résolution spectrale pour pouvoir être détectées au-dessus du continuum (voir spectre SWS de la figure 4.5). Comme on peut le voir sur le spectre de l'AGN (voir Fig. 4.2), la détection des raies [NeVI](7.65 μm) et [NeV](14.32 μm) avec ISOCAM sera d'autant plus difficile que les UIBs peuvent contribuer à ces longueurs d'ondes (UIBs à 7.7 μm et 14.3 μm).

Nous venons de décrire au travers d'un prototype de galaxie active NGC 1068 les différentes propriétés spectrales associées à un AGN. L'émission provenant de l'AGN de NGC 1068 se distingue clairement de l'émission infrarouge des régions de formation d'étoiles. Le fort continuum croissant de 5 à $10\ \mu\text{m}$ ainsi que les raies à fort potentiel d'ionisation comme le [NeV] et [NeVI] tracent de façon univoque la présence d'un AGN. En effet, ces deux caractéristiques spectrales n'ont jamais été observées dans les galaxies starbursts. L'étude des spectres dans l'infrarouge moyen nous donne ainsi le moyen de dissocier la contribution starburst de celle de l'AGN en utilisant des critères

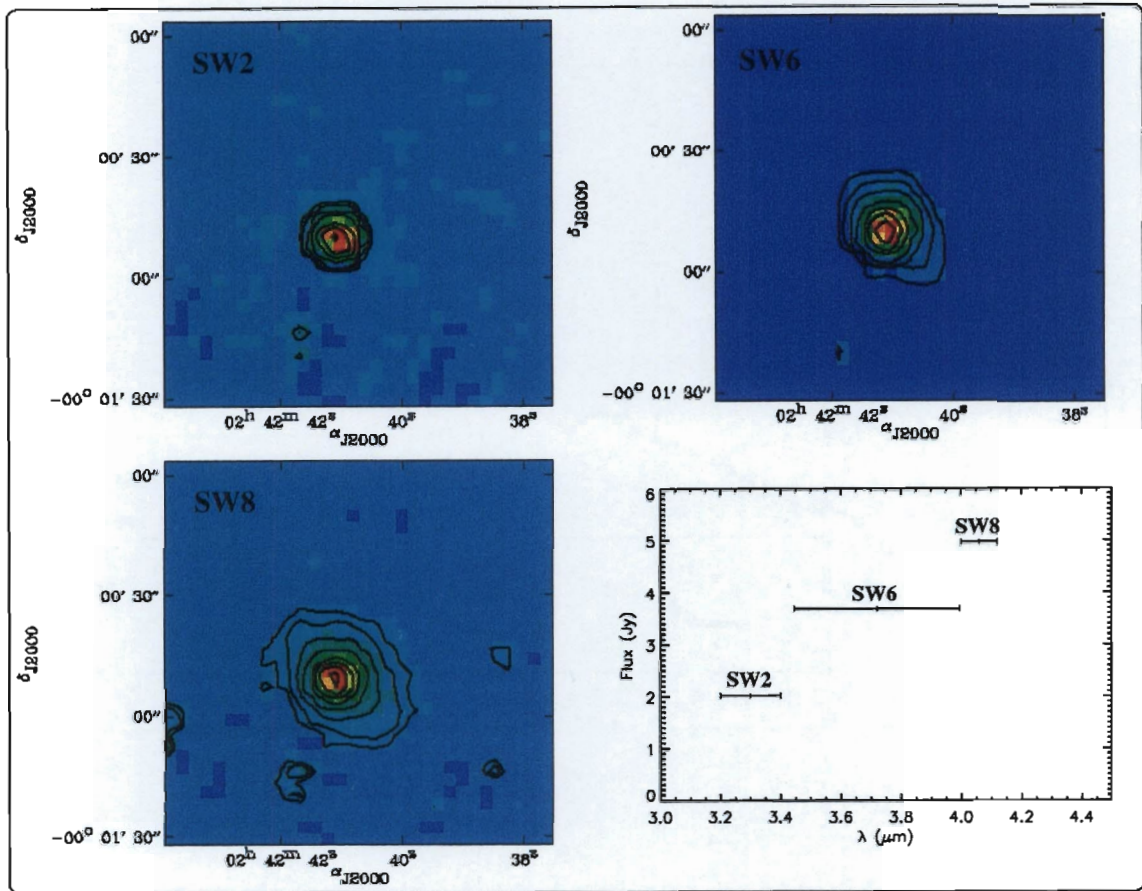


FIG. 4.3 – Observations ISOCAM dans les filtres SW2(3.2-3.4 μm), SW6(3.45-4 μm) et SW8(4-4.12) de NGC 1068.

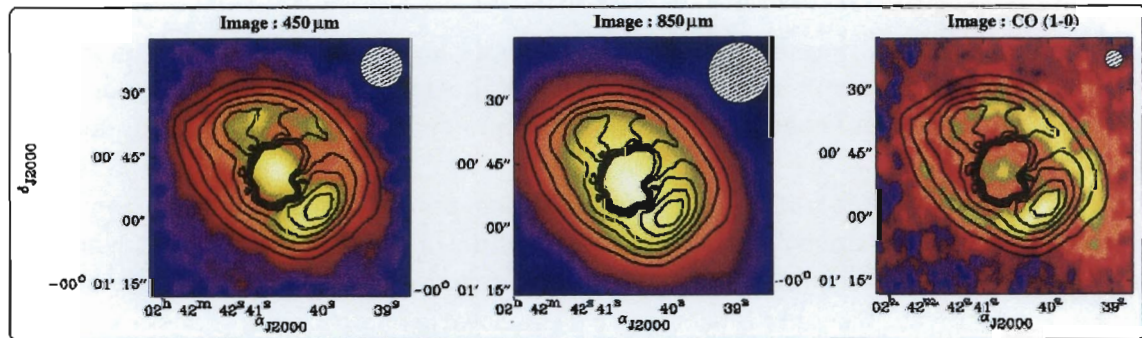


FIG. 4.4 – Cartes SCUBA(450-850 μm , Papadopoulos and Seaquist, 1999) et CO(1-0) (Helfer and Blitz, 1995) avec les contours ISOCAM de la bande infrarouge à 7.7 μm .

spectraux.

Sur la figure 4.4, on remarque que les UIBs traçant les PDRs liées à la formation d'étoiles sont bien corrélées spatialement à l'émission de la poussière froide observée par SCUBA à 450 et 850 μm (Papadopoulos and Seaquist, 1999). Ces régions en forme d'anneau sont en fait deux bras spiraux connectés aux extrémités d'une barre stellaire observée en bande K à 2.2 μm (Scoville et al., 1988). La bonne coïncidence spatiale entre la poussière chaude et la poussière froide respectivement dans l'infrarouge moyen

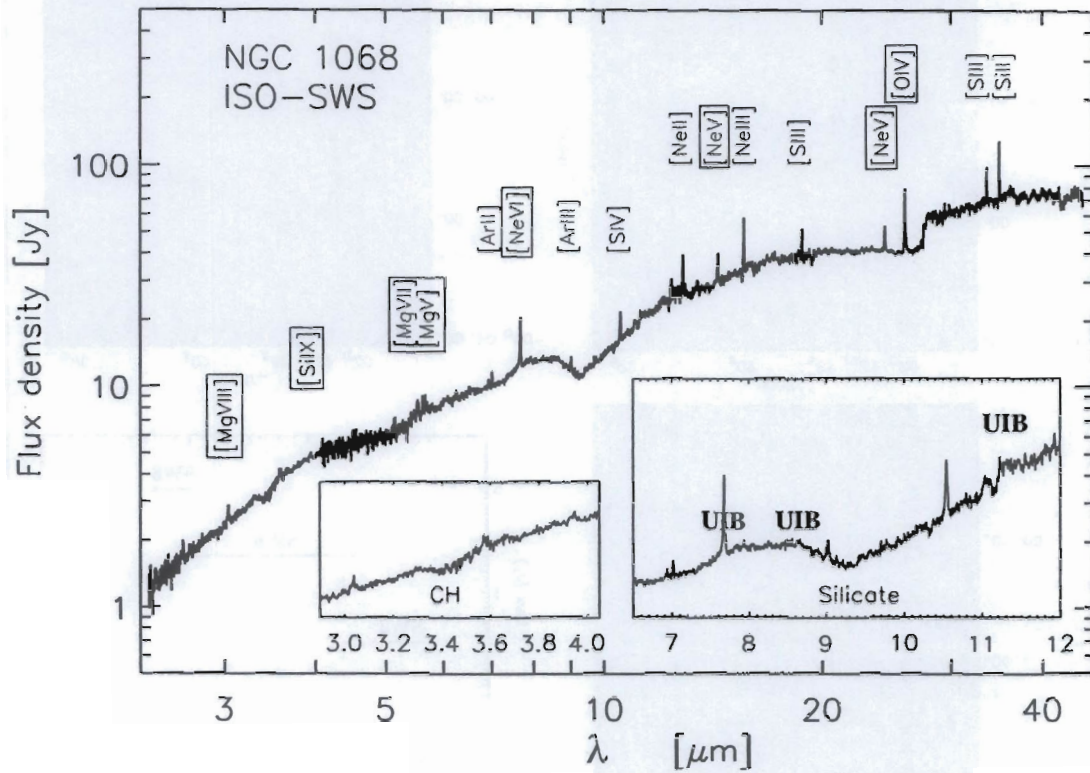


FIG. 4.5 – Spectre SWS de NGC1068 entre 2.5 et 45 μm (Lutz et al., 1998b). Les raies encadrées caractérisent uniquement la présence d'un AGN. Les autres raies sont observées également dans les régions starbursts.

et lointain indique que les différents types de poussière (VSGs, PAHs, gros grains) sont chauffés dans les mêmes régions. C'est la distribution en taille des grains de poussière dans ces régions qui rend compte des différents types d'émission thermique dans l'infrarouge.

Grâce au pouvoir de séparation d'ISOCAM, nous pouvons suivre l'évolution de la contribution AGN/Starburst entre 5 et 16 μm . Sur la figure 4.6, on peut voir que l'AGN domine l'émission totale intégrée dans un rayon de 1.4 kpc incluant les régions starbursts et le noyau. La contribution de ce dernier varie en diminuant dans le domaine spectral couvert par les UIBs ($\sim 70\%$) et devient maximale au niveau du continuum ($\sim 90\%$). Ceci est en parfait accord avec l'absence d'UIBs dans l'AGN. Finalement, un bon moyen pour tracer les régions de formation d'étoiles consiste à faire une carte des UIBs après avoir soustrait le continuum. Cette technique sera utilisée par la suite pour mettre en évidence des AGNs entourés de régions starbursts en utilisant le rapport UIB/Continuum. Ce rapport devient très faible dans l'AGN ce qui permet de distinguer les starbursts environnant. Cependant bien que l'AGN domine globalement l'émission en infrarouge moyen, la contribution starburst devient dominante à 450 μm . L'AGN contribue plus en infrarouge moyen qu'en infrarouge lointain excepté peut être dans les galaxies ultralumineuses où l'extinction est telle que même le rayonnement à 10 μm est absorbé pour être réémis dans l'infrarouge lointain.

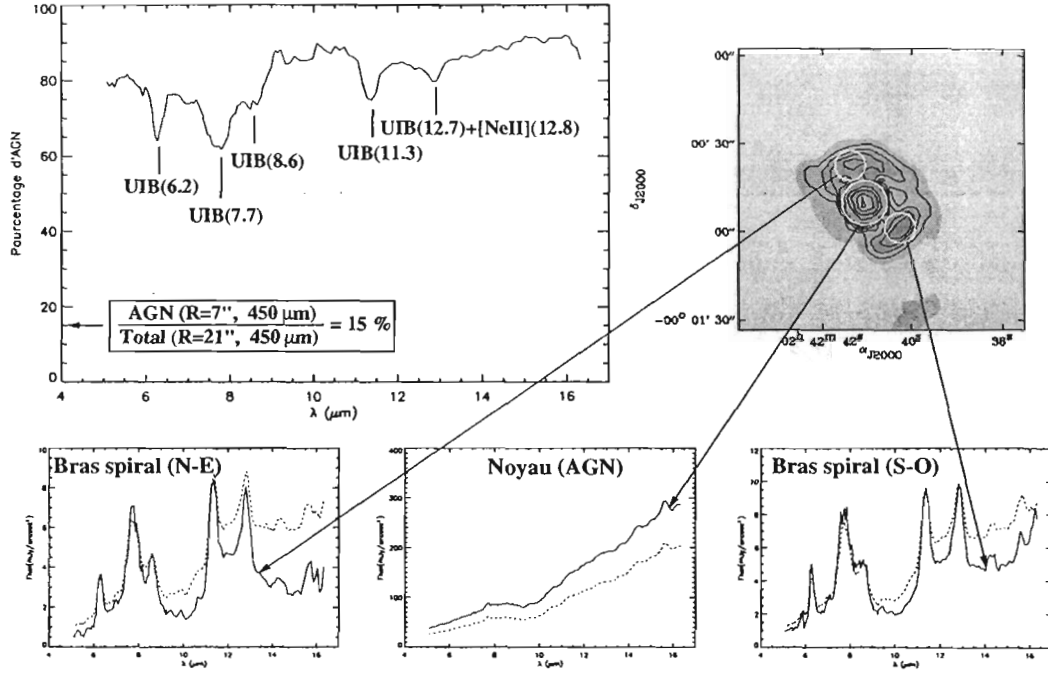


FIG. 4.6 – Variation de la fraction AGN/Starburst entre 5 et 16 μm . En haut, on peut voir l'évolution de la contribution de l'AGN en fonction de la longueur d'onde. En bas, les spectres de deux régions distinctes dans les bras spiraux ainsi que celui de l'AGN sont représentées (traits continus: spectres CVF déconvolués à chaque longueur d'onde, traits discontinus: spectres CVF non déconvolués). L'image de NGC 1068 a été obtenue après déconvolution et permet de séparer spatialement l'émission de l'AGN des régions starbursts.

Bien que la résolution spatiale d'ISOCAM permette de séparer la région centrale dominée par l'AGN des régions starbursts, les régions proches de l'AGN telles que le cône d'ionisation ou le tore moléculaire ne peuvent être résolues spatialement. Grâce à l'imagerie à haute résolution obtenue avec les télescopes basés au sol, nous pouvons accéder à ces échelles spatiales inférieures à la seconde d'arc. Braatz et al. (1993) ont montré que $\sim 50\%$ de la luminosité à $12.4\mu\text{m}$ provenait d'une composante étendue corrélée spatialement avec le cône d'ionisation détecté en [OIII] et dans le continuum optique avec le HST (Macchetto et al., 1994). La direction de l'émission est perpendiculaire au plan supposé du tore. Les modèles (Braatz et al., 1993) ainsi que la faible polarisation de l'émission (Aitken et al., 1984) suggèrent que l'émission étendue provient de nuages de poussières chauffées par le champ de rayonnement collimaté UV-X produit au centre de l'AGN. L'émission non-résolue au centre pourrait provenir du tore moléculaire. Des observations à $10.3\mu\text{m}$ ont même montré que la source ponctuelle associée au cœur de l'AGN ne pouvait pas être responsable de plus de 40% de l'émission. La présence d'une faible absorption dans la bande des silicates à $9.7\mu\text{m}$ suggère également qu'une fraction importante de l'émission provient de régions extérieures non obscurcies par le tore moléculaire entourant l'AGN. En utilisant l'optique adaptative, Rouan et al. (1998) ont résolu en infrarouge proche la structure centrale en trois composantes: (1)

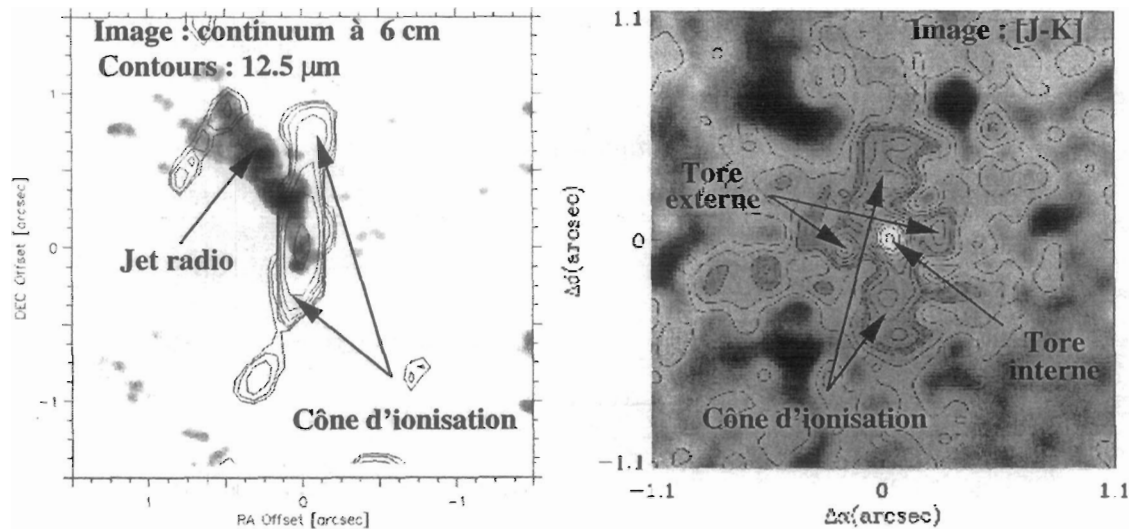


FIG. 4.7 – Observations de NGC 1068 dans l'infrarouge moyen à $12.5\mu\text{m}$ (image de gauche, Bock et al., 1998), et dans l'infrarouge proche (image de droite, Rouan et al., 1998).

une source ponctuelle (Diamètre $< 9\text{ pc}$), (2) une source étendue dans la région ionisée au dessus et en-dessous de l'AGN, (3) une structure allongée perpendiculaire assimilée au tore moléculaire (voir Fig. 4.7). Ils ont dérivé dans le cœur ($0.2''$ en diamètre) une extinction $A_V > 25$ avec des grains de poussière à 1500 K . Des observations à $12.5\mu\text{m}$ montrent également une structure allongée dans la direction du jet qui correspondrait à de la poussière chauffée par le champ de rayonnement du noyau Seyfert jusqu'à une distance de $1'' = 70\text{ pc}$ (Bock et al., 1998).

Ces différentes observations de NGC 1068 montrent que la majeure partie de l'émission en infrarouge moyen ne provient pas de la région centrale mais du milieu ionisé environnant situé à plusieurs dizaines de parsecs du noyau. Le rayonnement UV-X produit par l'AGN est ainsi capable de chauffer à de telles distances la poussière située le long du cône d'ionisation (Antonucci and Miller, 1985; Baldwin et al., 1987). De plus, le fait que l'on ne détecte pas d'UIBs dans le spectre de l'AGN (incluant évidemment l'ensemble des régions étendues dans un diamètre de 700 pc) prouve que même le spectre de poussières chauffées dans les régions ionisées est dépourvu d'UIBs. Les molécules responsables de cette émission sont probablement détruites même à quelques $20\text{--}30\text{ pc}$ du cœur de l'AGN. La faiblesse de la bande d'absorption des silicates est incompatible avec une très forte extinction dérivée des observations en X ($N > 10^{24}\text{ cm}^{-2}$, $A_V > 500$, Mulchaey et al., 1992) dans les Seyferts 2. Cette absence de silicates ne peut être causée par leur destruction puisque la température estimée dans le cône d'ionisation ($T \sim 350\text{ K}$, Tresh-Fienberg et al., 1987) est bien en-dessous de leur température d'évaporation ($T \sim 1000\text{ K}$). L'explication la plus probable est que l'émission en infrarouge moyen provient de régions optiquement épaisses aussi bien au cœur de l'AGN enfoui dans le tore moléculaire que dans les régions extérieures (Bock et al., 1998).

Les observations dans l'infrarouge proche ont également montré l'importance des chocs dans les AGNs à partir de la détection de raies vibrationnelles d'hydrogène molécu-

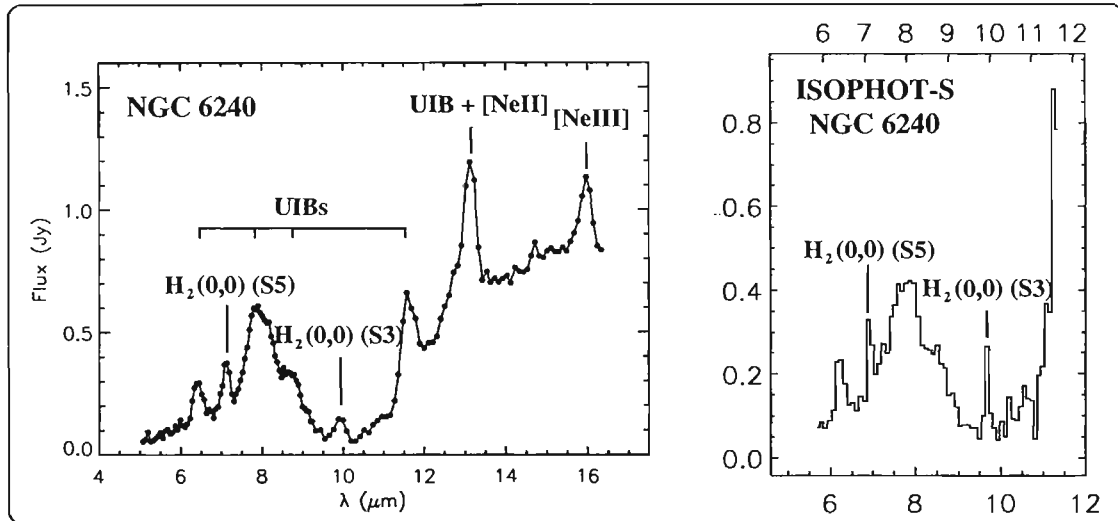


FIG. 4.8 – Observations de NGC 6240 dans l'infrarouge moyen.

laire. Ces chocs qui peuvent être associés aux restes de supernova (Oliva and Moorwood, 1990), aux starbursts (Hall et al., 1981) ainsi qu'aux jets nucléaires participent-ils au chauffage de la poussière et à la destruction des UIBs? L'absence de raies H_2 à 6.7 et 9.7 μm dans le spectre de l'AGN suggère fortement que les chocs ne sont pas responsables du continuum de poussières chaudes observé. La galaxie en interaction NGC 6240 qui se caractérise dans l'infrarouge proche par de très fortes raies H_2 induites par des chocs (van der Werf et al., 1993) présente également les deux raies H_2 à 6.7 et 9.7 μm observées avec ISOCAM (voir Fig. 4.8). De plus, son spectre est globalement très différent de celui de l'AGN observé dans NGC 1068, en étant très similaire aux régions de formation d'étoiles avec un faible continuum entre 5 et 10 μm et d'intenses UIBs. Les restes de supernova qui présentent aussi de fortes signatures de chocs avec le milieu interstellaire (Oliva et al., 1999) possèdent aussi des signatures spectrales dans l'infrarouge moyen très différentes des AGNs (voir 4.9). Il est intéressant de noter à quel point cette différence est grande avec un faible continuum et de fortes raies ioniques pour les restes de supernova et un fort continuum avec de faibles raies ioniques pour les AGNs. Cette différence au niveau de l'émission en infrarouge moyen rend difficile l'interprétation de l'émission provenant des AGNs à partir de restes de supernova compactes au cœur des galaxies actives (Filippenko, 1989; Terlevich et al., 1995).

L'absence de raies H_2 ainsi que la présence d'un fort continuum entre 5 et 10 μm qui caractérisent les AGNs suggèrent que le champ de rayonnement de l'AGN est la seule source d'énergie capable de produire ce type d'émission par l'intermédiaire de la poussière sans faire intervenir de façon prépondérante le chauffage induit par les chocs localisés dans le cône d'ionisation.

On a vu par l'intermédiaire de NGC 1068 que plus de la moitié de l'émission dans l'infrarouge moyen peut provenir de régions étendues ionisées qui sont faiblement affectées par l'absorption contrairement au cœur de l'AGN. De plus, les propriétés spectrales de ces régions peu obscurcies montrent une absence d'UIBs ainsi qu'un fort continuum à courtes longueurs d'onde ($< 10 \mu\text{m}$). En effet, dans le cas contraire, on devrait dé-

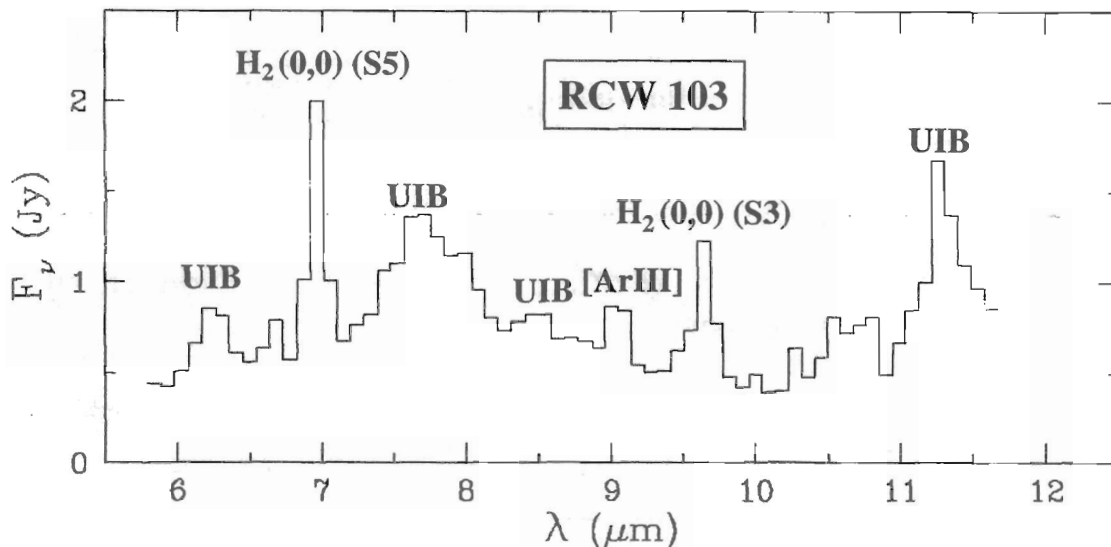


FIG. 4.9 – Spectre ISOPHOT-S du reste de supernova RCW103 (Oliva et al., 1999) caractérisé par de fortes raies H_2 . Les UIBs proviennent essentiellement de l'émission du disque galactique.

tecter une fraction non-négligeable d'UIBs dans le spectre ISOCAM (73 % du flux à $12.7 \mu\text{m}$ d'après Bock et al., 1998) et ne pas détecter d'émission importante étendue en-dessous de $10 \mu\text{m}$ ce qui n'est pas observé (Alloin and Marco, 1997; Bock et al., 1998; Rouan et al., 1998). Ces régions contenant de la poussière chauffée par le champ de rayonnement de l'AGN peuvent donc être facilement détectées puisqu'elles se trouvent en-dehors du tore moléculaire optiquement épais de plus leur spectre infrarouge ne peut être produit par des régions de formation d'étoiles. Nous disposons ainsi d'un moyen efficace pour découvrir des AGNs complètement obscurcis au travers du tore dense en poussières puisqu'une fraction non négligeable de l'émission peut être observée le long du cône d'ionisation. En effet, supposons que le tore soit complètement opaque au rayonnement entre $2\text{--}16 \mu\text{m}$, nous observerions tout de même un spectre "AGN" (sans UIB, avec un fort continuum $<5 \mu\text{m}$) au niveau du cône d'ionisation. Il est d'ailleurs intéressant de noter que l'absorption dérivée de l'infrarouge moyen est plus faible que celle provenant des rayons X durs (Mulchaey et al., 1992) qui sortent difficilement du tore dans les Seyferts 2. Dans certains cas comme NGC 1068 seule la composante diffusée des X durs est détectée (Elvis and Lawrence, 1988).

Nous allons maintenant étudier dans la section suivante les propriétés en infrarouge moyen d'une autre galaxie active, Centaurus A.

4.4 Le prototype de radio galaxie : CENTAURUS A

Centaurus A (NGC 5128) est la plus proche galaxie elliptique géante abritant un AGN avec un jet (Israel, 1998). Sa proximité ($D=3.5 \text{ Mpc}$, $1''=17 \text{ pc}$, Hui et al., 1998) nous permet d'étudier en détail les régions nucléaires (taille $\sim 100 \text{ pc}$ correspondant à la résolution d'ISOCAM) ainsi que les régions étendues (taille $\sim 6 \text{ kpc}$).

Les observations ISOCAM ont été réalisées dans le but de cartographier en filtres larges à 7 et 15 μm (LW2, LW3) la structure étendue observée en CO et en infrarouge (Eckart et al., 1990; Israel et al., 1991; Quillen et al., 1992; Rydbeck et al., 1993) alignée le long de la bande de poussières (voir Fig. 4.10). La résolution spatiale d'ISOCAM de $\sim 5''$ nous a permis de mettre en évidence une large structure bi-symétrique de 5' de diamètre (voir Fig. 4.10). On a interprété cette structure comme étant une barre permettant ainsi d'alimenter la région centrale où se trouve l'AGN. Plus de détails concernant la présence de la barre ont été publiés dans A&A (Mirabel et al., 1999, voir l'article en fin de chapitre).

La région centrale (50' \times 50') contenant l'AGN ainsi qu'une partie de la barre a été observée en mode spectro-imagerie entre 5 et 16 μm avec le meilleur échantillonnage (1.5''/pixel). Sur la figure 4.11, on a résumé l'ensemble des spectres CVF accessibles dans cette région. A la différence de NGC 1068, l'AGN ne représente que 45% de l'émission intégrée dans l'intervalle spectral du CVF (10 % du flux total de la galaxie à 15 μm (LW3)). On peut ainsi soustraire très facilement l'émission provenant des régions de formation d'étoiles le long de la barre de la contribution de l'AGN.

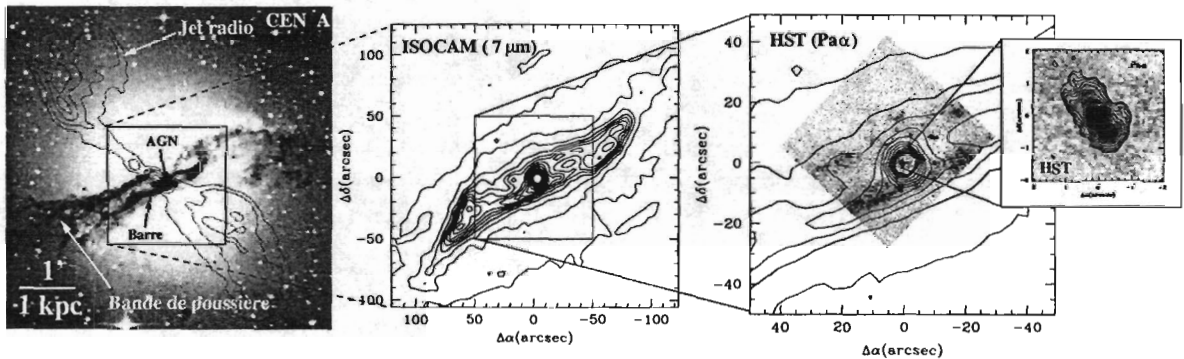


FIG. 4.10 – Différentes observations de Cen A des grandes (à gauche) jusqu'aux plus petites échelles spatiales (à droite) actuellement accessibles. Ce schéma provient en partie de l'article de Marconi et al. (1999).

On retrouve clairement l'ensemble des propriétés spectrales observées dans l'AGN de NGC 1068 à ceci près que la bande d'absorption des silicates est plus prononcée dans Cen A. Le spectre en infrarouge moyen de l'AGN au centre de Cen A est dépourvu d'UIBs. Il présente aussi un continuum à courtes longueurs d'onde ($< 10 \mu\text{m}$) non-négligeable qui domine l'émission entre 4 et 5 μm . Les régions périphériques ne sont pas détectées dans les filtres SW2, SW6, SW8 où le continuum de l'AGN domine par la présence de poussières très chaudes (jusqu'à 1000 K).

Pour conclure, nous résumons dans la figure 4.12, l'ensemble des propriétés spectrales et spatiales de l'émission en infrarouge moyen dans les AGNs. En haut, les modèles ainsi que les observations faites à haute résolution nous ont permis d'associer l'émission à de la poussière chaude chauffée soit aux abords de l'AGN dans le tore moléculaire ($< 1 \text{ pc}$), soit à plus grande distance dans la région du cône d'ionisation (jusqu'à 70 pc du noyau dans NGC 1068, Bock et al., 1998). Les différences observées au niveau de l'absorption au travers de la bande des silicates à 9.7 μm pourraient être dues à un effet

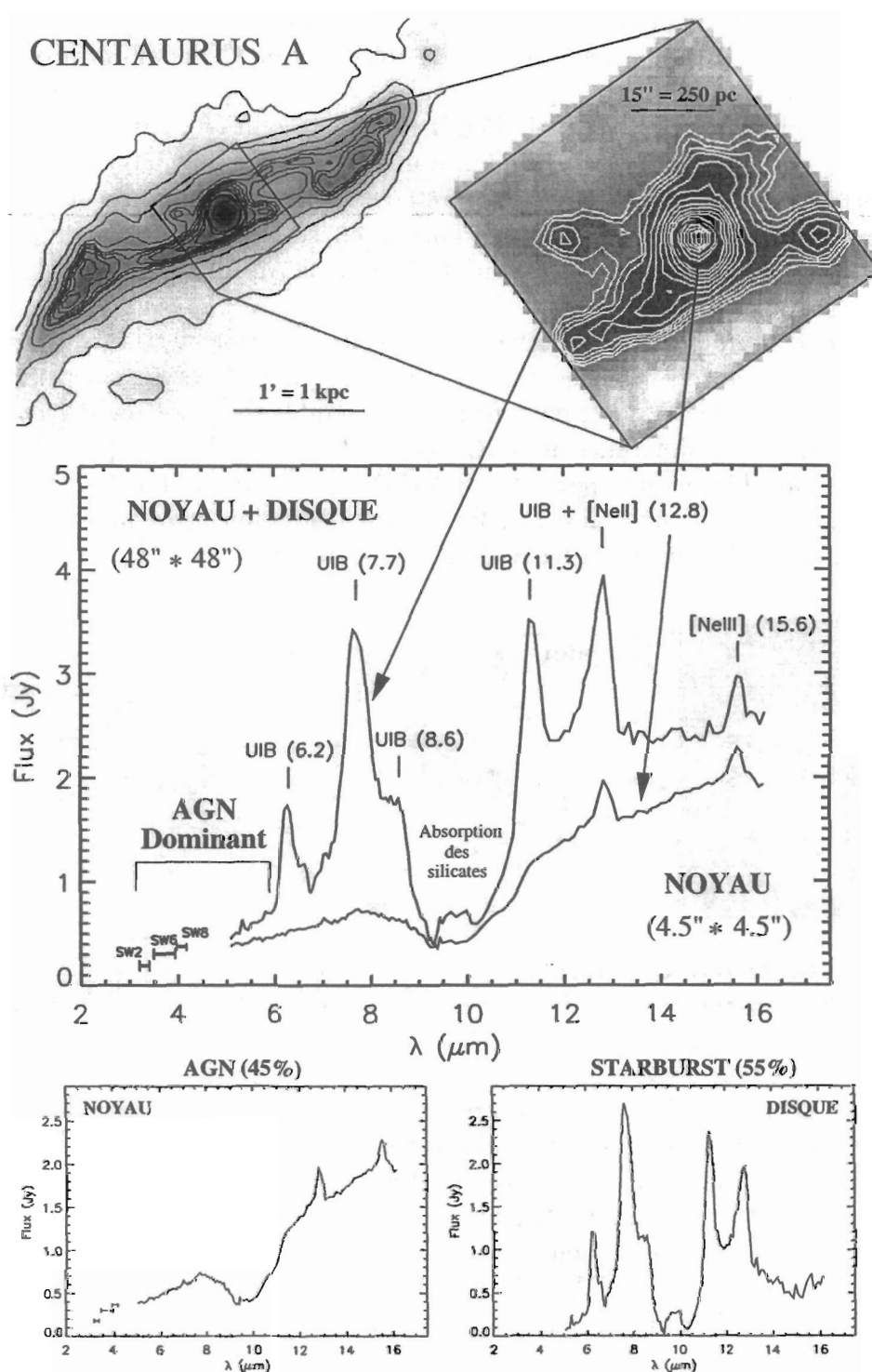


FIG. 4.11 – Observation en mode CVM de la région centrale de Cen A. En haut à gauche, on a l'observation grand champ obtenue en filtre large LW2 de la structure spirale. En haut à droite, la région centrale observée en mode CVM a permis d'obtenir des spectres (au milieu) de 5 à 16 μm de l'AGN (en bas à gauche) et des régions extérieures (en bas à droite). Seul l'AGN a été détecté dans les filtres SW entre 3 et 4 μm .

de ligne de visée par rapport au tore mais également aux quantités de poussières présentes dans la NLR. Dans le schéma du bas, j'ai représenté d'une manière plus générale les propriétés à plus grande échelle en infrarouge moyen des galaxies actives. Comme nous le verrons par la suite, les problèmes dus à l'absorption ainsi qu'à la dilution spatiale de l'AGN dans les régions starbursts rendent difficile la détection de celui-ci dans des objets contenant une forte densité de gaz en leur cœur ($M(\text{H}_2) > 10^{9-10} M_\odot$, $A_V > 100 \text{ mag}$) ainsi que dans les galaxies plus lointaines.

Après avoir étudié sur les objets les plus proches les phénomènes starbursts et AGNs, nous allons dans le chapitre suivant nous intéresser aux galaxies en interaction. Parmi cette classe de galaxies sélectionnées par leur morphologie (queues d'interaction, plusieurs noyaux), les galaxies ultralumineuses ($L_{\text{IR}} > 10^{12} L_\odot$) présentent des signes de forte activité starburst et AGN.

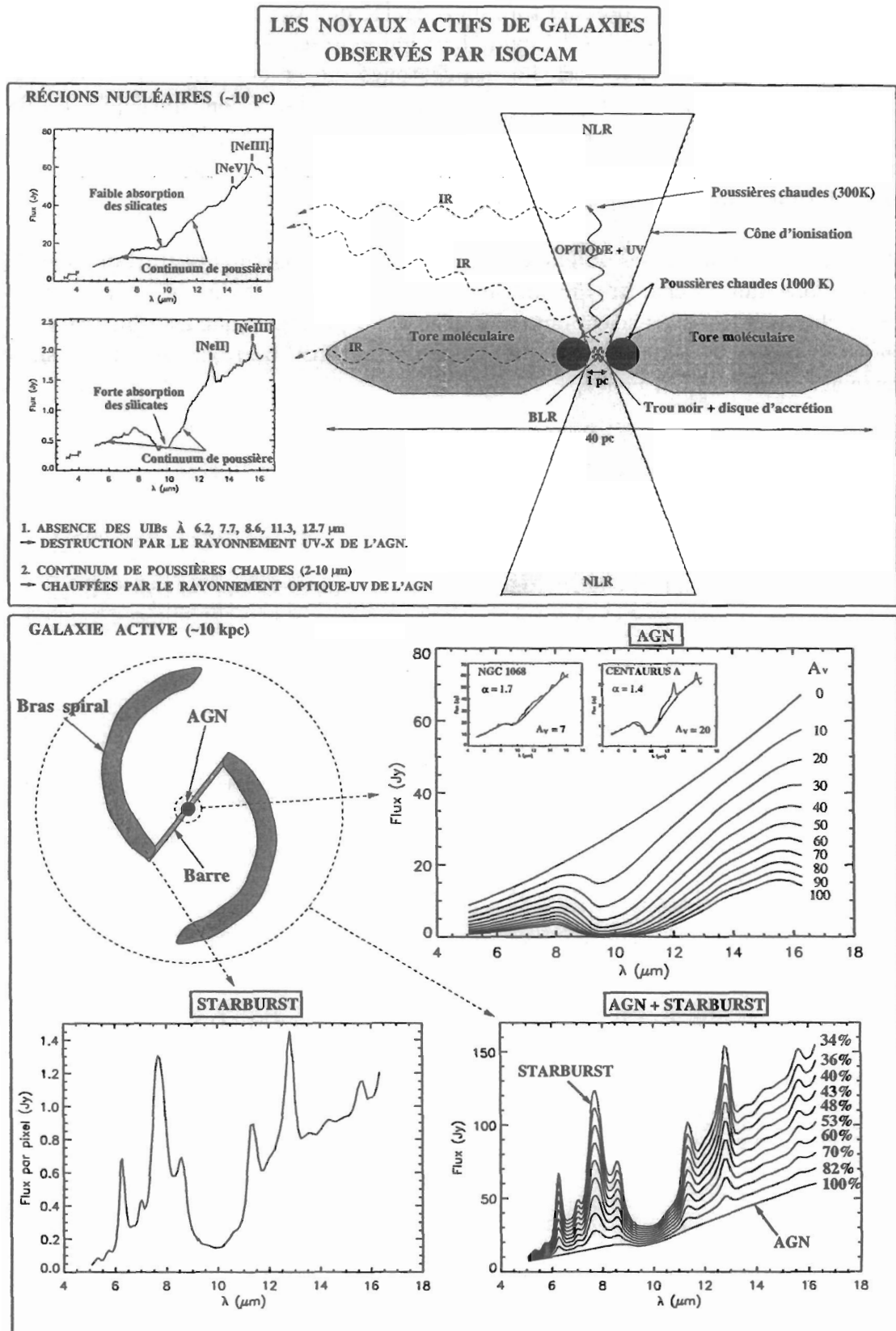


FIG. 4.12 – Les galaxies actives et leurs AGNs observés dans l'infrarouge moyen.

Astron. Astrophys. 341, 667–674 (1999)

ASTRONOMY
AND
ASTROPHYSICS**A barred spiral at the centre
of the giant elliptical radio galaxy Centaurus A*****I.F. Mirabel^{1,2}, O. Laurent¹, D.B. Sanders³, M. Sauvage¹, M. Tagger¹, V. Charmandaris⁴, L. Vigroux¹, P. Gallais¹, C. Cesarsky¹, and D.L. Block⁵**¹ CEA/DSM/DAPNIA Service d'Astrophysique F-91191 Gif-sur-Yvette, France² Instituto de Astronomía y Física del Espacio, cc 67, suc 28. 1428 Buenos Aires, Argentina³ Institute for Astronomy, University of Hawaii, 2680 Woodlawn Drive, Honolulu, HI 96822, USA⁴ Observatoire de Paris, DEMIRM, 61 Av. de l'Observatoire, F-75014 Paris, France⁵ Department of Computational and Applied Mathematics, University of the Witwatersrand, Private Bag 3, WITS 2050, South Africa

Received 7 October 1998 / Accepted 12 October 1998

Abstract. We report observations at mid-infrared and sub-millimeter wavelengths of Centaurus A (Cen A, NGC 5128), the giant elliptical galaxy that harbors the closest radio loud Active Galactic Nucleus (AGN) to Earth. The dust emission from the deep interior of Cen A reveals a bisymmetric structure with a diameter of $5'$ (5 kpc), centred at the AGN. This structure is remarkably similar to that of a barred spiral galaxy, with the bar lying in a plane that is tilted $\sim 18^\circ$ from the line of sight. The true nature of the distribution of dust in the inner regions of Cen A is noticeably displaced from the more chaotic and widespread optical obscuration. The barred spiral is a quasi-stable structure formed at the center of the giant elliptical from the tidal debris of a gas-rich object(s) accreted in the past 10^9 years. The total size and mass of interstellar gas in the barred spiral at the center of Cen A is comparable to the small Local Group spiral galaxy Messier 33. The observation of this remarkable structure opens the more general question on whether the dusty hosts of giant radio galaxies like Cen A, are "symbiotic" galaxies composed of a barred spiral inside an elliptical, where the bar serves to funnel gas toward the AGN.

Key words: galaxies: active – galaxies: individual: NGC 5128=Cen A – galaxies: kinematics and dynamics – galaxies: structure – infrared: galaxies

its way from typical galactic radii of several kiloparsecs down to a few parsecs from the centre, and at the rates required to power the AGN. Bar structures have been proposed in theoretical models (Shlosman et al. 1989) as the dynamical instabilities that deliver fuel to the AGN. However, the observation of bars of cold gas and dust in the deep interior of luminous giant ellipsoidal systems of stars that hosts a powerful radio source has been difficult.

Cen A may serve as a template to investigate these questions. The prominent dark bands seen across it suggest that it is the product of the merger between a small gas-rich galaxy with a larger elliptical (Baade & Minkowski 1954). The radio emission comes primary from two large lobes separated by 5° on the sky (~ 300 kpc at a distance of 3.5 Mpc). The lobes are powered by relativistic jets that emanate from a central region ~ 0.01 pc in size, widely believed to contain a massive black hole (Kellermann et al. 1997). The center is hidden behind large columns of gas and dust with visual extinctions that reach values as large as $A_V = 70$ mag. The absorption is less critical in the near infrared bands ($1-2\mu\text{m}$), but at these wavelengths the contribution to the total flux from old stars belonging to the ellipsoidal galaxy is a major, if not dominant contributor to the total flux. It is in the mid-infrared and longer wavelengths that the emission from dust in the deep interior of a giant ellipsoidal system can be better traced.

1. Introduction

Radio galaxies are thought to be giant ellipticals powered by accretion of interstellar matter onto a supermassive black hole. Interactions with gas rich galaxies may feed them with cold interstellar matter, but a major problem is how the fueling gas finds

2. ISO and SCUBA observations

Mid-infrared observations were made with the Infrared Space Observatory (Kessler et al. 1996) Camera ISOCAM (Césarsky et al. 1996) using the broad-band filters LW2 ($5.0-8.5\mu\text{m}$, $\lambda_0 = 6.75\mu\text{m}$) and LW3 ($12-18\mu\text{m}$, $\lambda_0 = 15\mu\text{m}$), and a Circular Variable Filter (CVF) covering the range $5-16\mu\text{m}$. The LW2 and LW3 observations were made with a $3''$ /pixel lens resulting in full widths at half-maximum (FWHM) of $4''$ and $6''$ respectively. The CVF observations were done with a $1.5''$ /pixel lens resulting in full widths at half-maximum (FWHM) in the range of $3-6''$ for wavelengths of $5-18\mu\text{m}$.

Send offprint requests to: I.F. Mirabel
(mirabel@discovery.saclay.cea.fr)

* Based on observations with ISO, an ESA project with instruments funded by ESA Member States (especially the PI countries: France, Germany, the Netherlands and the United Kingdom) and with participation of ISAS and NASA.

The standard data reduction procedures described in the ISO-CAM¹ manual were followed (Delaney 1997). Dark subtraction was performed using a model of the secular evolution of ISOCAM's dark current (Biviano et al. 1997). Cosmic rays were removed using a multi-resolution median filtering method (Starck et al. 1996) while the memory effects of the detector were corrected using the so-called IAS transient correction algorithm which is based on an inversion method (Abergel et al. 1996). The final raster was constructed after using the instrumental flat fields and correcting for the lens field distortion. These methods and their consequences are discussed in detail in Starck et al. (1998).

Submillimeter observations at 450 μm and 850 μm were obtained using the Submillimeter Common-User Bolometer Array (SCUBA, Cunningham et al. 1994) at the James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) on Mauna Kea. Observations at both wavelengths were obtained simultaneously using the 91 element shortwavelength array at 450 μm (HPBW = 9.5'') and the 37 element longwavelength array at 850 μm (HPBW = 14.7'').

3. The dust emission

Fig. 1 shows the mid-infrared, radio, and optical images of Cen A. The 7 μm emission from dust reveals a bisymmetric structure of 5' (~ 5 kpc for a distance of 3.5 Mpc) in total length. In contrast to the optical dark lanes which show a wide and somewhat chaotic distribution, the structure of the mid-infrared emission is remarkably thin, smooth and bisymmetric.

Fig. 3 shows maps of Cen A in the mid-infrared and submillimeter wavelengths. The emission at 7 μm and 15 μm observed with ISO comes from small dust grains (radii 0.05 μm and less) that can undergo large temperature ($T_d \geq 100$ K) excursions (Désert et al. 1990). On the contrary, the 450 μm and 850 μm emission is mostly due to the large and cold ($T_d \sim 10$ -20 K) dust grains which dominate the extinction of visible light. The warm dust is clearly displaced from the most prominent optical dark lanes; in the outer regions the 7 μm and 15 μm disks exhibit anticlockwise twists with increasing radius, whereas the dark lanes in the optical image twist clockwise. The emitting dust is less extended and clearly displaced from the most prominent optical dark lanes.

Fig. 3 shows that these two dust components have the same general distribution, and therefore the displacement of the emitting dust from the optical dark lanes in Figs. 1 and 3 is not due to major differences between the spatial distributions of the cold and very warm dust components. In a three dimensional tilted and warped disk, projection effects play an important role. The optical appearance of the dark lanes in a luminous ellipsoidal system may be strongly affected by relatively small amounts of cold dust in the outer parts of the bending disk located in the foreground side of the luminous ellipsoidal distribution of stars.

¹ The ISOCAM data presented in this paper were analyzed using "CIA", a joint development by the ESA Astrophysics Division and the ISOCAM Consortium led by the ISOCAM PI, C. Cesarsky, Direction de Sciences de la Matière, C.E.A., France.

Table 1. Mid-Infrared (ISO) and Submillimeter (SCUBA) Fluxes

Filter	λ_m (μm)	f_{nucleus} (Jy)	f_{disk} (Jy)	f_{total} (Jy)
ISOCAM LW2	7	0.6	8.8	9.4
IRAS 12 ^a	12	—	—	11.2
ISOCAM LW3	15	1.2	10.8	12.0
IRAS 25	25	—	—	20.1
IRAS 60	60	—	—	145
IRAS 100	100	—	—	217
SCUBA 450	450	13	177	190
SCUBA 850	850	19	76	95
LW2/LW3		0.50	0.82	0.78
450/850		0.68	2.32	2.00

Note: $R < 7.5''$ (nucleus); $R = 7.5''$ –60'' (disk); $R < 60''$ (total)

^a IRAS fluxes at 12 μm , 25 μm , 60 μm , and 100 μm were computed from processed maps using the maximum entropy deconvolution routine HIRES (Surace et al. 1993), which provides a beamsize of $\sim 1.5'$. It was impossible to give a reliable estimate for the IRAS flux within the central 15'' region.

Table 1 gives the infrared/submillimeter fluxes for the inner nuclear region (radius $\leq 7.5''$) and the bar (annulus of 7.5''–60''). The infrared and submillimeter fluxes from the nuclear region are typically less than 10% of the total flux from the annulus of 7.5''–60'' radius mapped with SCUBA. Assuming $M_d = \frac{f_{\nu} D^2}{\kappa_{\nu} B_{\nu}(T_d)}$ where $\kappa_{\nu} = 40(\nu/3 \cdot 10^{12} \text{ Hz})^n$ with $n=1.5$ -2 and D the distance, the combination of the ISOCAM, SCUBA and IRAS 60 μm and 100 μm fluxes defines a spectral energy distribution for the annulus that can be fitted by two dust components: $T_d = 35$ K and $M_d = 7 \cdot 10^4 M_{\odot}$ and $T_d = 12$ K and $M_d = 4 \cdot 10^7 M_{\odot}$. Such large masses of cold dust are observed in spiral galaxies (Alton et al. 1998, Krügel et al. 1998), once the spectrum at $\geq 100 \mu\text{m}$ is taken into account.

The far-infrared luminosity of Cen A is $8 \cdot 10^9 L_{\odot}$, and when combined with a total H_2 mass of $3.4 \cdot 10^8 M_{\odot}$ results in a $L_{\text{FIR}}/M(\text{H}_2)$ of $24 L_{\odot}/M_{\odot}$ (Eckart et al. 1990b), which is typical of starburst galaxies (Sanders & Mirabel 1996).

The ISOCAM broad band spectrum of the nucleus, shown in Fig. 2, is typical of the mid-infrared spectra of AGNs, whereas the spectra of the bright spots in the arcs and arms are typical of photo-dissociation regions in spiral galaxies. The main distinct features in the mid-infrared spectrum of the nucleus relative to the bright spots in the disk are: 1) a noticeable continuum flux below 6 μm that seems to be present in every AGN, 2) a strong and steeply rising continuum as a function of wavelength associated with a faint PAH emission perhaps due to contamination by the bar, 3) deep absorption from silicates around 10 μm , 4) [Ne III] and [Ne V] emission lines detected in the nuclear region only. The [Ne V] high-excitation line which is predominantly powered by hard AGN radiation fields (Genzel et al. 1998) is only present in the nuclear region of Cen A.

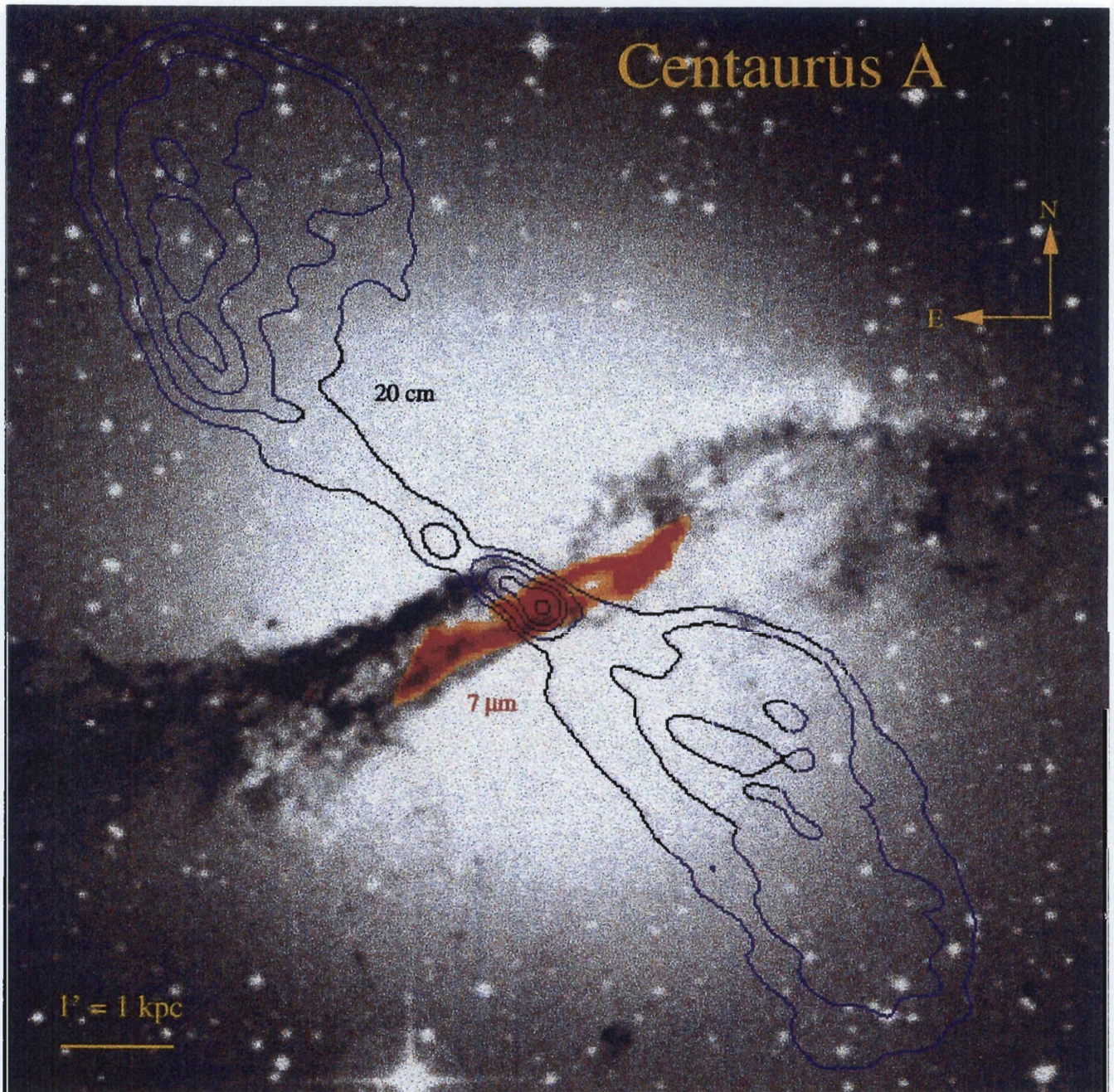


Fig. 1. The ISO 7 μm emission (red image) and VLA 20 cm continuum (Condon et al, 1996) (violet contours), overlaid on an optical image (black and white) from the Palomar Digital Sky Survey. The emission from dust with a bisymmetric morphology at the centre is about 10 times smaller than the overall size of the shell structure in the elliptical (Malin et al. 1983) and lies on a plane that is almost parallel to the minor axis of its giant host. Whereas the gas associated to the spiral rotates with a maximum radial velocity of 250 km s^{-1} , the ellipsoidal stellar component rotates slowly approximately perpendicular to the dust lane (Wilkinson et al. 1986). The synchrotron radio jets shown in this figure correspond to the inner structure of a double lobe radio source that extends up to 5° ($\sim 300 \text{ kpc}$) on the sky. The jets are believed to be powered by a massive black hole located at the common dynamic center of the elliptical and spiral structures.

4. Discussion

4.1. The barred spiral

In the following (see Fig. 4) it is shown that the interpretation of the bisymmetric structure, observed at the centre of Cen A

as a barred spiral is fully consistent with: 1) the morphology of the dust lanes, observed in galaxies classified as barred spirals (such as NGC 1530), 2) the kinematics observed in CO data (Eckart et al. 1990b, Quillen et al. 1992) and 3) theoretical

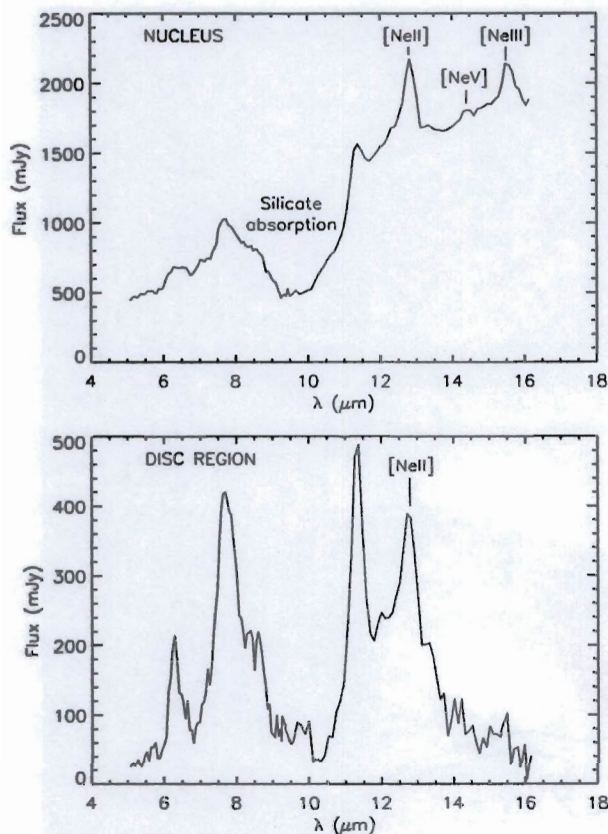


Fig. 2. ISOCAM CUF spectra for a region of $4''$ radius around the bright unresolved infrared nucleus (*upper panel*), and for a typical starburst spot in the primary bar (*lower panel*). The spectrum of the nucleus is typical of mid-infrared spectra of AGNs which always show a strong continuum flux below $6\mu\text{m}$ associated with faint or absent PAH emission (Lutz et al. 1998). The $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$ emission line ratio which is a measure of the UV hardness if the radiation field is harder in the nucleus than anywhere else in Cen A. On the contrary, the extra-nuclear region presents strong PAH bands and a faint continuum in agreement with a lower radiation field.

models (Athanassoula 1992) that predict shocks at the leading edge of bars, producing an arc-like appearance of the warm dust.

The overall structure exhibited by the $7\mu\text{m}$ emission from Cen A is that of a barred spiral with a primary bar extending $\sim 1'$ in radius from the nucleus, connected in its outer ends to trailing spiral arms that have the typical structures seen in barred spirals with primary bars that end near, but somewhat inside, their corotation resonance. The strongest $7\mu\text{m}$ emission from the primary bar is along its leading edge in what takes the form of two slightly curved arcs, where shocks and density enhancements should take place according to theoretical models (Athanassoula 1992). The southeast arc moves toward the observer and is in the foreground side, whereas the northwest arc moves away and is in the background. The inner ends of these two arcs are connected to what may be a secondary nuclear bar whose position angle is defined by the NIR K($2.2\mu\text{m}$) band polarization (Packham et al. 1996). On the plane of the sky the radio jets appear perpendicular to the innermost polarization

angle. The rotation in NGC 1530 is clockwise whereas that in Cen A is anticlockwise, and the appearance of the trailing arms in Cen A can be understood if at the ends of the primary bar ($r \sim 70''$) there is an increase in the inclination due to a strong warp in the disk. This is suggested by the apparent drop in the radial velocities beyond $r \sim 70''$ (see Fig. 4). Because of this strong warp the winding structure of the spiral arms in Cen A has a leading appearance. The kinematics of the gas in the lower panel is consistent with a barred spiral, where the bar rotates as a rigid body within $70''$, whereas at radii larger than $\pm 70''$ the gas exhibits the differential rotation (flat rotation curve) typical of galactic disks.

An apparent E-W high velocity feature inside a radius of $\sim 20''$ with a high velocity extent of ~ 280 to 750 km s^{-1} in the $^{12}\text{CO}(2-1)$ emission is not accounted for in the above description.

ISOCAM can not resolve features smaller than $\sim 5''$ but the vectors of polarization at K($2.2\mu\text{m}$) which are produced by absorption of the radiation from stars embedded in the dust lane (Packham et al. 1996) can be used to trace with higher angular resolution the preferential distribution of dust in the innermost central region. The position angle of the polarization shown in Fig. 4 suggests the presence of a secondary bar, or "nuclear" bar, of gas of few hundred parsecs in size. This presumed secondary bar inside the primary bar could be the dynamical instability that brings gas towards the supermassive black hole (Shlosman et al. 1989). In fact, molecular gas absorption has been detected in front of the compact nuclear source at millimeter wavelengths (Eckart et al. 1990a, Israel et al. 1991, Quillen et al. 1992, Wiklind & Combes 1997), and it has been proposed (Israel et al. 1991) that the absorption at redshifted velocities represents gas falling into the centre.

The jets and the near infrared polarization angle of the innermost region appear to be perpendicular on the plane of the sky (Fig. 4). However, the NE jet lies in the foreground and when deprojected from the plane of the sky, the jets may not necessarily be perpendicular to the nuclear bar. Hubble Space Telescope (HST) observations of $\text{Pa}\alpha$ ($\lambda = 1.87\mu\text{m}$) have shown a structure with an elongation of $2''$ that has been interpreted as an inclined nuclear disk of ionized gas (Schreier et al. 1998), but it is not perpendicular to the radio jets.

The ISOCAM observations of Cen A show more details in the inner morphology of the interstellar matter than previous single-dish millimeter observations of the molecular gas (Eckart et al. 1990b, Israel et al. 1991, Quillen et al. 1992, Rydbeck et al. 1993). However, the more general characteristics of the circumnuclear molecular structure that were proposed from CO(2-1) observations with a beamwidth (FWHM) of $22''$ using deconvolution techniques (Rydbeck et al. 1993), and from a variety of molecular lines (Israel et al. 1991), have general resemblances with the structures now seen with higher angular resolution in the mid-infrared. We point out that the interpretation of a barred spiral in the inner region of Cen A is not in conflict, and is even fully consistent with the presence of a warped disk at larger radii. The barred spiral is a dynamic instability, i.e. a density wave in the warped disk of gas and dust.

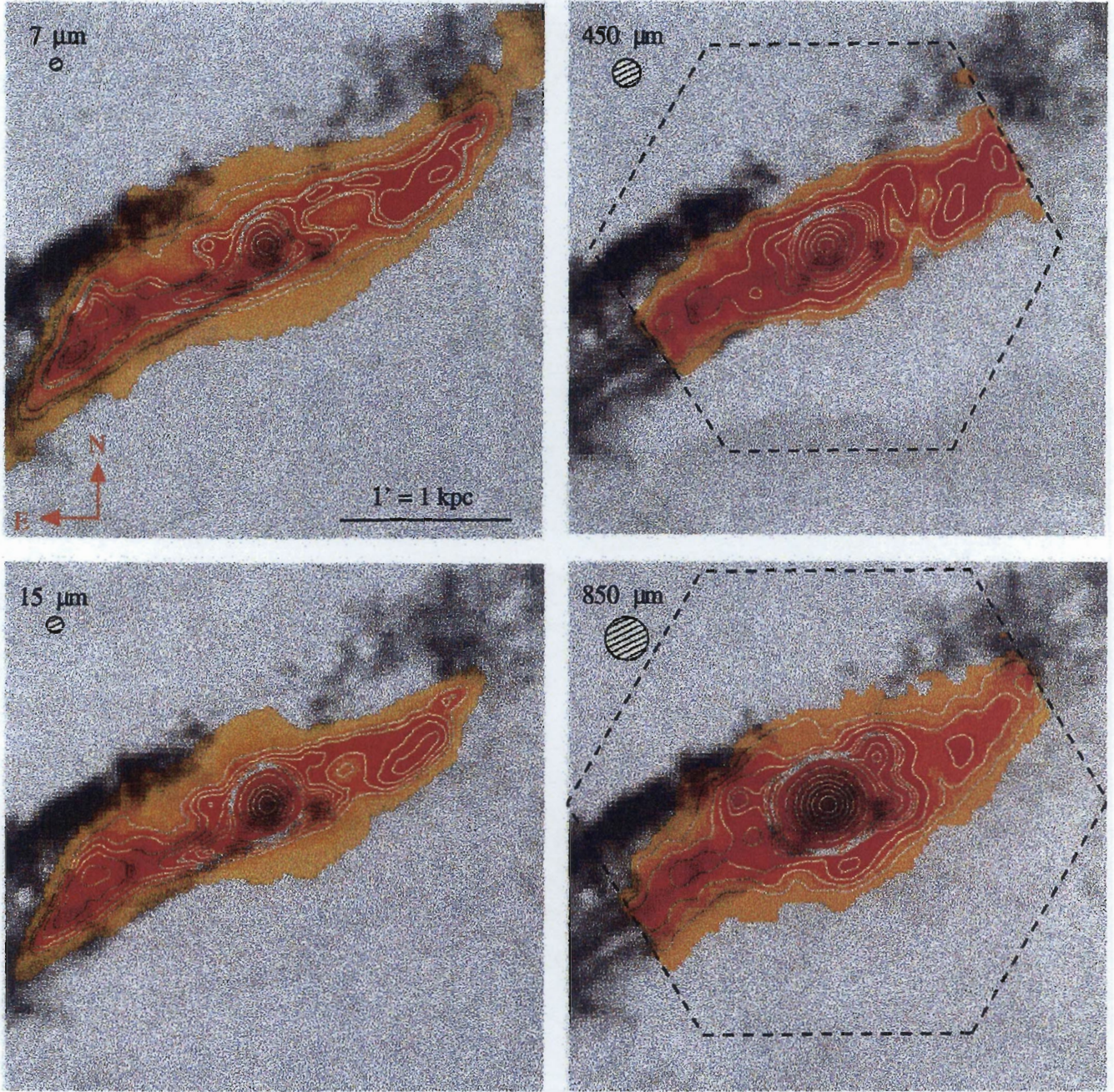


Fig. 3. Distribution of dust in the inner region of Cen A as observed at mid-infrared and submillimeter wavelengths, with optical dark lanes superimposed. In the outer regions the $7\ \mu\text{m}$ and $15\ \mu\text{m}$ disks exhibit anticlockwise twists with increasing radius, whereas the dark lanes in the optical image twist clockwise. No submillimeter emission was detected from the most prominent dark lanes. For the observations with ISOCAM were used the broad-band filters LW2 ($5.0\text{--}8.5\ \mu\text{m}$, $\lambda_0 = 6.75\ \mu\text{m}$) and LW3 ($12\text{--}18\ \mu\text{m}$, $\lambda_0 = 15\ \mu\text{m}$). The LW2 and LW3 observations were made with a $3''/\text{pixel}$ lens resulting in full widths at half-maximum (FWHM) of $4''$ and $6''$ respectively. The observations at $450\ \mu\text{m}$ and $850\ \mu\text{m}$ were obtained simultaneously using the 91 element shortwavelength array at $450\ \mu\text{m}$ (HPBW = $9.5''$) and the 37 element longwavelength array at $850\ \mu\text{m}$ (HPBW = $14.7''$). The hexagons in the third and fourth panels indicate the limits of the SCUBA maps. Contours for the $7\ \mu\text{m}$ map are: 2.2 5.3 3.5 4.4 5.5 5.5 7.1 11 18 24 mJy arcsec^{-2} , for the $15\ \mu\text{m}$ map: 2.2 5.3 3.5 4.4 5.5 5.5 7.1 11 18 29 mJy arcsec^{-2} , for the $450\ \mu\text{m}$ map: 41 58 83 116 133 150 166 232 331 464 580 mJy arcsec^{-2} , for the $850\ \mu\text{m}$ map: 10 14 18 22 24 25 29 30 36 72 145 218 290 363 436 mJy arcsec^{-2} .

4.2. The formation and survival of the barred spiral

It is believed that the same accretion event(s) that began tearing apart a gas-rich object(s) also created the faint stel-

lar (Malin et al. 1983) and gaseous (Schiminovich et al. 1994) shells observed around Cen A. It is known that the accretion of a small disk galaxy by a massive elliptical would lead to the

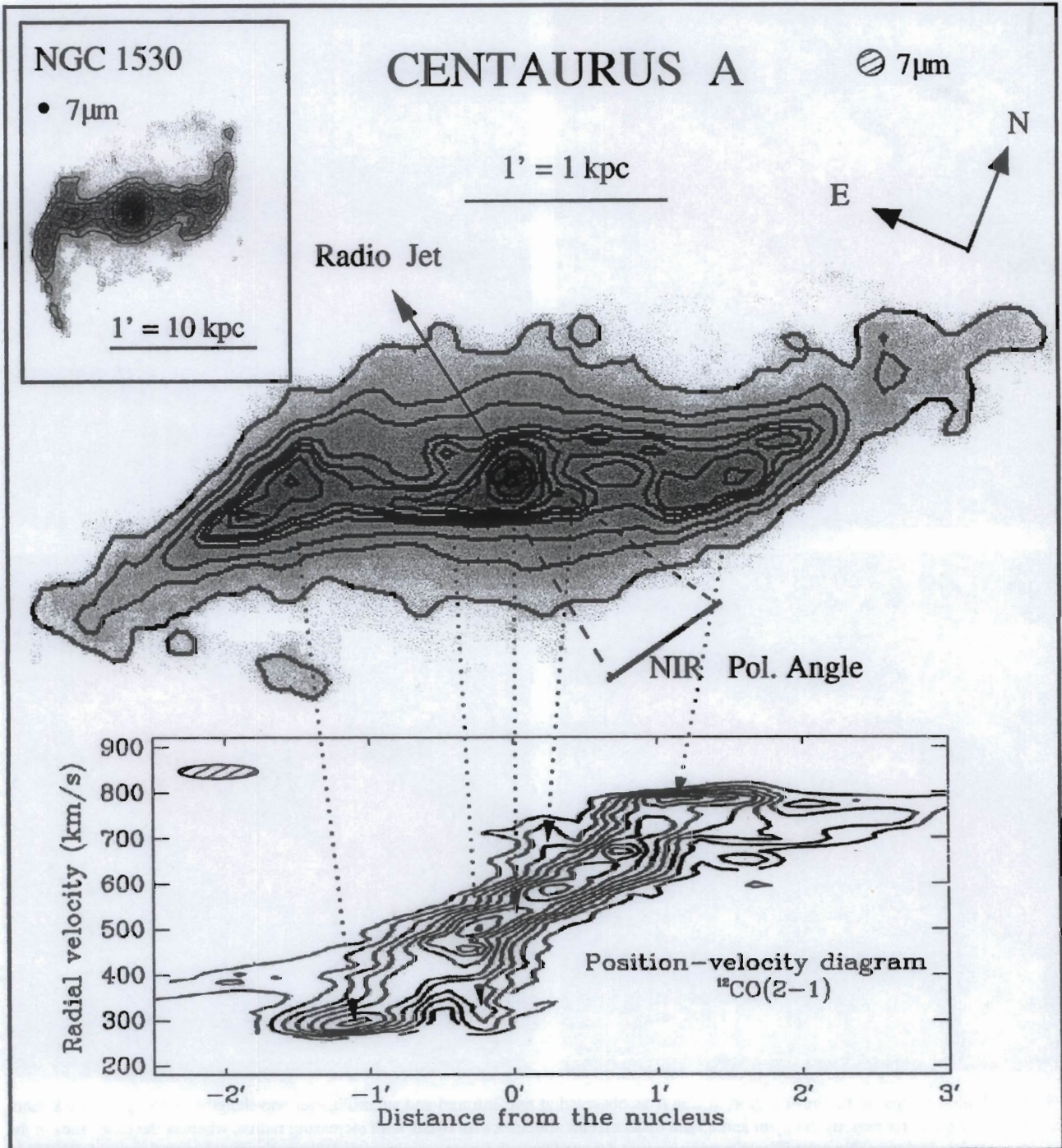


Fig. 4. ISO $7\mu\text{m}$ image and $^{12}\text{CO}(2-1)$ position-velocity map (along PA -63.5° with FWHM $= 30''$, Quillen et al. 1992) of the central region of Cen A. Note the similarity in morphology with the $7\mu\text{m}$ image of the prototype barred spiral NGC 1530 (courtesy of C. Bonoli) shown in the upper inset. In NGC 1530 the plane that contains the bar is tilted by $\sim 55^\circ$ to the line of sight (Reynaud & Downes 1997), whereas in Cen A it is tilted by $\sim 18^\circ$ (Dufour et al. 1979, Graham 1979). The overall structure exhibited by the $7\mu\text{m}$ emission from Cen A is that of a barred spiral with a primary bar extending $\sim 1'$ in radius from the nucleus, connected in its outer ends to trailing spiral arms. The strongest $7\mu\text{m}$ emission from the primary bar is along its leading edge in what takes the form of two slightly curved arcs, where shocks and density enhancements take place. The inner ends of these two arcs are connected to what may be a secondary nuclear bar whose position angle is defined by the NIR K($2.2\mu\text{m}$) band polarization (Packham et al. 1996). On the plane of the sky the radio jets appear perpendicular to the innermost polarization angle. The kinematics of the gas in the lower panel is consistent with a barred spiral, where the bar rotates as a rigid body within $70''$, whereas at radii larger than $\pm 70''$ the gas exhibits the differential rotation (flat rotation curve) typical of galactic disks. An apparent E-W high velocity feature inside a radius of $\sim 20''$ with a high velocity extent of ~ 280 to 750 km s^{-1} in the $^{12}\text{CO}(2-1)$ emission is not accounted for in the above description.

complete tidal disruption of the former as it spirals inward in the potential of the elliptical galaxy (Hernquist & Quinn 1989). In this process the gas decouples from the stars and sinks more readily to the centre (Barnes & Hernquist 1992), forming a new disk out of the gaseous component alone. In Cen A the overall angular momentum of the newly formed disk is not aligned with the major axis of the elliptical. Therefore, the gaseous disk is subject to torques forcing it to warp (Barnes & Hernquist 1992). Although gas is still settling towards the central regions, the morphological and dynamical symmetry of the spiral indicate that it is a stable structure and not a transient feature. Rotating at 250 km s^{-1} it must have undergone several full rotations depending on how long after the initial encounter it took the gas to settle into the central disk we now see.

Using near infrared photometry (Quillen et al. 1993), as well as the kinematics of the gas, a disk-to-total mass ratio within the turnover radius of the rotation curve (within a sphere of $70''$) of the order of 10^{-2} is obtained. N-body simulations would rule out that a low-mass stellar bar has formed spontaneously in the disk, and survived at steady-state. However these simulations consider stellar disks, while here we are dealing with a gaseous one. Assuming a much smaller velocity dispersion for the molecular gas of $5\text{--}10 \text{ km s}^{-1}$ (compared with 50 km s^{-1} for a stellar disk and 145 km s^{-1} for the spheroidal component in Cen A, Wilkinson et al. 1986, Eckart et al. 1990a), we derive a much lower Toomre's Q parameter (of the order of 1) for the gaseous disk in Cen A. Therefore, a gaseous disk is much more self-gravitating than a stellar one of similar mass. Consequently, the bar in Cen A can be in a quasi-steady state and might have been formed spontaneously, or be driven.

4.3. The symbiotic galaxy Cen A:

A template for giant radio galaxies

Probably Cen A is not an exception and could serve as a well-positioned template to examine in detail the clues to the origin and evolution of activity in early-type radio galaxies with similar radio morphology, namely, with giant double radio lobes. This class of radio galaxies can only be produced if there is continuous injection of relativistic jet energy for $\geq 10^8$ years, which requires enormous reservoirs of interstellar gas and dust. In fact, prominent dust bands are frequently observed in the hosts of giant radio galaxies. Fornax A, the second nearest radio galaxy of this class, exhibits the dusty signs for the merger of gas-rich galaxies on an early type galaxy. Cygnus A, the prototype radio galaxy with double morphology, is crossed by prominent optically dark bands that contain $\sim 10^8 M_\odot$ of dust (Robson et al. 1998). On the other hand, it has been shown that in dusty radio galaxies with double radio structure, the dust is usually found perpendicular to the radio axis, which suggests a connection between the mechanism leading to these double radio morphologies and the rotation axis of the dust (Kotanyi & Ekers 1979, van Dokkum & Franx 1995).

The specific mechanism in rapidly rotating disks of gas and dust that brings fuel to the central engine in radio loud AGNs has been difficult to probe observationally for several reasons.

First, galaxies similar to Cen A are at greater distances (for instance, Fornax A is 5-10 times and Cygnus A is ~ 70 times more distant than Cen A), and at those distances it is difficult to see the detailed morphology of dust and gas on scales $\leq 100 \text{ pc}$. Second, at optical and near-infrared wavelengths the light from the old stellar population with a giant ellipsoidal distribution overwhelms any emission from dust and newly formed stars in the deep interior. It is in the mid-infrared that the emission from very warm dust can be better traced, and to this end we had to wait for the unprecedented capabilities of ISOCAM. Third, the observation of the cold gas distribution by means of millimeter observations of weak molecular line emission on top of the strong continuum of powerful radio galaxies is a difficult task.

The barred spiral at the centre of Cen A has dimensions comparable to that of the small Local Group galaxy Messier 33, and is much larger than the small dusty and/or ionized spiral features of 100-200 pc radius seen with the HST in elliptical galaxies (Ford & Tsvetanov 1998). It lies on a plane that is almost parallel to the minor axis of the giant elliptical. Whereas the spiral rotates with maximum radial velocities of $\sim 250 \text{ km s}^{-1}$, the ellipsoidal stellar component seems to rotate slowly (maximum line-of-sight velocity is $\sim 40 \text{ km s}^{-1}$) approximately perpendicular to the dust lane (Wilkinson et al. 1986). The genesis, morphology, and dynamics of the spiral formed at the centre of Cen A are determined by the gravitational potential of the elliptical, much as a usual spiral with its dark matter halo. On the other hand, the AGN that powers the radio jets is fed by gas funneled to the center via the bar structure of the spiral. The spatial co-existence and intimate association between these two distinct and dissimilar systems suggest a "symbiotic" association.

5. Conclusions

From the observations reported here we can conclude that:

- 1) A quasi-stable barred spiral with the size of a small galaxy was formed at the centre of the giant elliptical Cen A, out of the tidal debris of gas-rich accreted object(s).
- 2) The spiral has an infrared luminosity per unit mass of interstellar molecular gas typical of starburst galaxies.
- 3) The bar may be the dynamical instability that serves to steadily feed the AGN with the amount of fuel that is required to power the giant radio lobes.
- 4) The spiral and the elliptical are distinct systems in symbiotic association.
- 5) The observations reported here open the question on whether giant radio galaxies are in general, like Cen A symbiotic galaxies.

Acknowledgements. We thank E. Athanassoula, A. Bosma, J. Lequeux, M. Prieto, D. Golombek, F. Macchetto & F. Combes for their valuable comments and aid on different aspects of this work. ISO is an ESA project with participation of ISAS and NASA. The JCMT is operated by the observatories on behalf of the UK Particle Physics and Astronomy Research Council, the Netherlands Organization for Scientific Research, and the Canadian National Research Council.

Chapitre 5

Les galaxies en interaction: starbursts et AGNs

Sommaire

5.1	Introduction	71
5.2	La galaxie "Les Antennes" (NGC 4038/39)	72
5.3	Les galaxies à anneaux	75
5.4	Les galaxies ultralumineuses	76
5.4.1	Le prototype de galaxie ultralumineuse : Arp 220	77
5.4.2	La galaxie "Les Super-Antennes" (IRAS 19254-7245)	79
5.4.3	Un système de galaxies en interaction : Arp 299	81
5.5	Article: "Dust in the wheel: The Cartwheel galaxy in the Mid-IR"	91

5.1 Introduction

Depuis maintenant 40 ans, les interactions de galaxies, ainsi que la formation d'étoiles qu'elles provoquent n'ont cessé d'attirer de plus en plus l'attention des astronomes. La première interprétation des systèmes multiples en termes d'interaction gravitationnelle date du début des années 40 (Holmger, 1941). Des études systématiques de systèmes perturbés furent entreprises par la suite avec les plus grands télescopes de l'époque (Zwicky, 1953; Arp, 1966). Les modèles numériques commencèrent à simuler correctement les galaxies observées (Toomre and Toomre, 1972). L'interaction gravitationnelle est responsable dans quelques galaxies de l'importante luminosité observée essentiellement dans l'infrarouge. Cette luminosité provient essentiellement du chauffage de la poussière par les étoiles jeunes et/ou par l'AGN. Cependant, la contribution relative des deux mécanismes physiques à la luminosité bolométrique reste encore incertaine. Nous avons vu que les AGNs ainsi que les starbursts possèdent des propriétés bien distinctes dans l'infrarouge moyen, et c'est donc à partir de ces acquis que nous allons étudier ces objets particuliers que sont les galaxies en interaction.

5.2 La galaxie “Les Antennes” (NGC 4038/39)

Les deux galaxies NGC 4038/39 sont souvent utilisées pour illustrer le résultat de l'interaction de deux galaxies spirales riches en gaz présentant une région intense starburst induite à l'endroit où se produit la collision des deux disques (Hummel and van der Hulst, 1986; Amram et al., 1992; Whitmore and Schweizer, 1996; Stanford et al., 1996). Grâce à sa relative proximité (21 Mpc, $5'' = 0.5$ kpc avec $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$), nous pouvons résoudre spatialement avec ISOCAM les deux noyaux séparés de 6 kpc, ainsi que la zone de superposition des disques. Sur la figure 5.1, la carte des Antennes à $15 \mu\text{m}$ révèle une source d'émission très brillante dans la zone d'interaction des bras qui contribue pour 15% de la luminosité totale du système à $15 \mu\text{m}$. Cette région domine également les deux noyaux (Mirabel et al., 1998, voir les contours à $15 \mu\text{m}$ sur la figure 5.2). De plus, le fort rapport $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}] \sim 1$ indique que cette région, complètement obscurcie dans le visible, abrite les étoiles les plus massives (étoiles de type O5, 44000 K, Kunze et al., 1996). Les observations en infrarouge révèlent ainsi la région la plus active du point de vue de la formation d'étoiles mais également celle qui semble être la plus obscurcie ($A_V \sim 70$ mag). En effet, les observations optiques effectuées avec le HST ne montrent aucune contre-partie optique localisée sur cette région compacte starburst. Certaines régions starbursts très enfouies nécessitent ainsi l'utilisation de l'infrarouge pour pouvoir être révélées.

Son spectre montre d'ailleurs les mêmes propriétés déjà observées au cœur des galaxies starbursts, à savoir un fort continuum des VSGs par rapport aux UIBs ainsi qu'une pente importante du continuum (voir le spectre de la figure 5.1). On atteint des rapports $\text{LW3}(15 \mu\text{m})/\text{LW2}(7 \mu\text{m}) \sim 5$, ce qui est encore plus extrême que dans les noyaux starbursts de M82 et NGC 253. On l'a déjà vu au chapitre 1, les UIBs proviennent principalement des PDRs et non pas des régions HII, mais l'émission des UIBs (LW2) et du continuum (LW3) reste spatialement corrélée à l'échelle des galaxies. Dans le cas de la galaxie des Antennes où la différence spectrale est très marquée entre la région starburst et le reste de la galaxie, on remarque clairement que le pic d'émission à $15 \mu\text{m}$ (région starburst extra-nucléaire) ne trouve pas de contre-partie équivalente en intensité à $7 \mu\text{m}$. Ceci est illustré sur la figure 5.3 où sont représentées plusieurs cartes traçant les différents composants spectraux (UIBs, continuum, raies $[\text{NeII}]$ et $[\text{NeIII}]$). Les pics d'émission des cartes UIBs (6.2, 7.7, 8.6 et $11.3 \mu\text{m}$) sont tous décalés de 1.8 kpc vers le nord de la région starburst extra-nucléaire. Le starburst extra-nucléaire domine l'émission au niveau du continuum à $14\text{--}15 \mu\text{m}$ et des raies $[\text{NeII}]$ et $[\text{NeIII}]$ qui sont des traceurs de régions HII. Il est intéressant de noter que la région dominée par les PDRs est proche du pic d'émission de la raie $[\text{CII}]$ à $158 \mu\text{m}$. Malgré la faible résolution spatiale, l'émission $[\text{CII}]$ est clairement centrée au nord du pic starburst vu en LW3 (Nikola et al., 1998). Cette raie qui est produite essentiellement dans les PDRs montre ainsi une distribution spatiale en accord avec celle des UIBs, différente de celle du continuum des VSGs. L'émission en infrarouge lointain à 100 et à $160 \mu\text{m}$ semble elle aussi provenir de cette même région décalée au nord. Le pic dans l'infrarouge lointain à $100 \mu\text{m}$ est localisé plus près du pic d'émission des UIBs comparé au pic à $15 \mu\text{m}$ (Bushouse et al., 1998).

Bien que l'incertitude de position soit très importante, l'ensemble des cartes en infra-

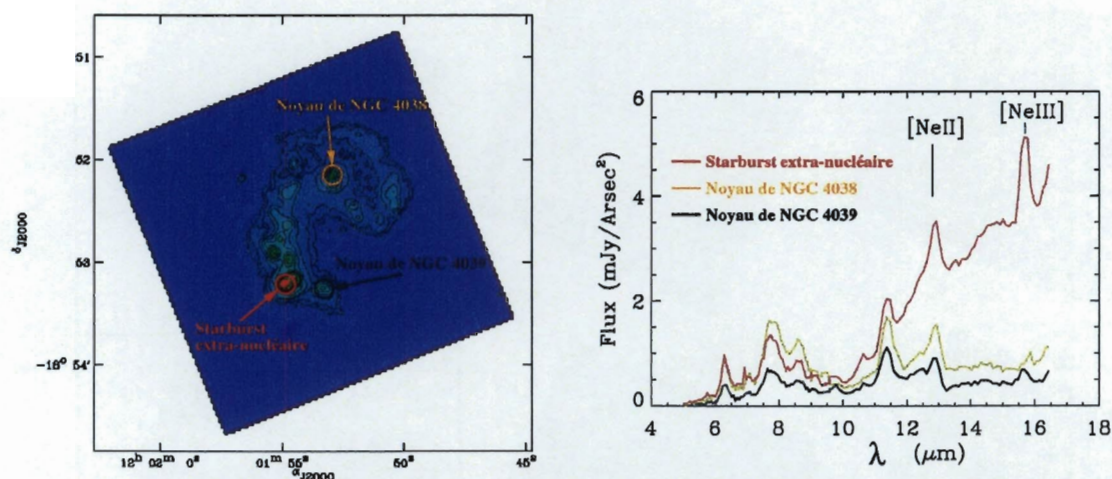


FIG. 5.1 – Cartes des Antennes à $15\mu\text{m}$ en filtre large LW3 (à gauche) avec les spectres des trois régions dominantes (à droite). Les 3 pics de luminosité correspondent aux deux noyaux et à une région ponctuelle associée à la région de collision entre les deux disques

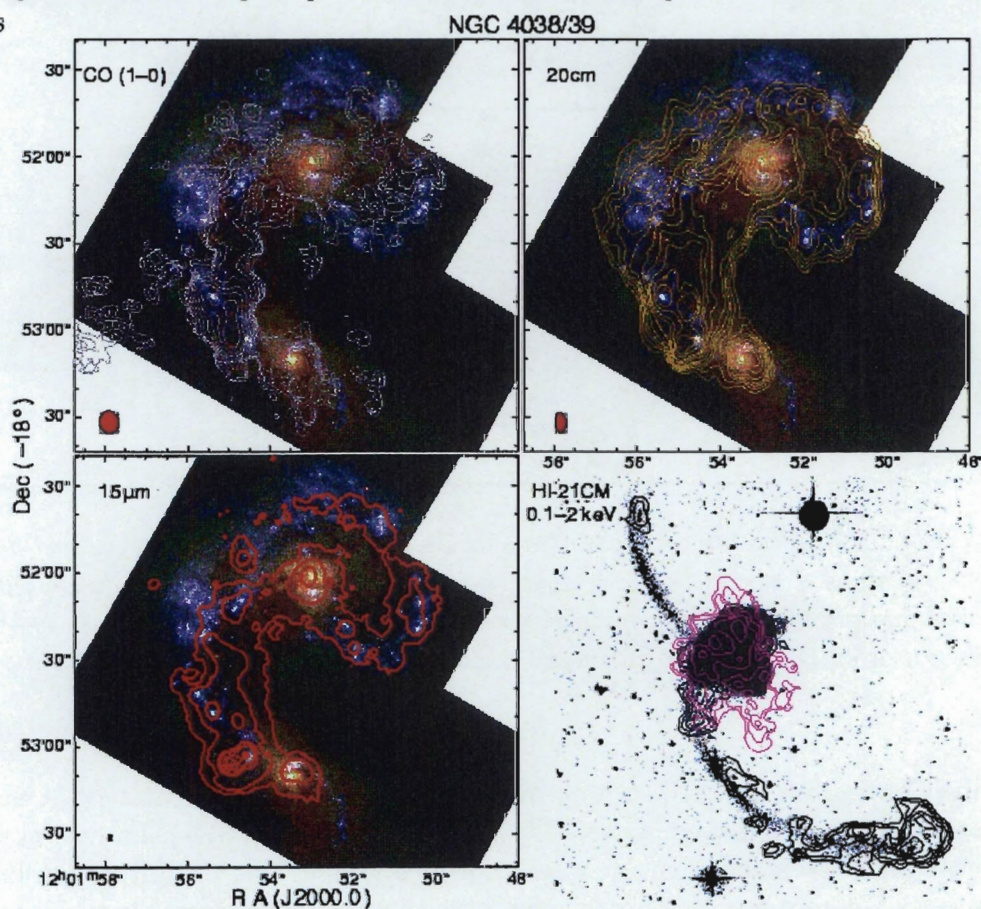


FIG. 5.2 – Cartes illustrant la galaxie "The Antennae" en CO, en continuum radio à 20 cm, en infrarouge moyen à $15\mu\text{m}$, en HI et en X (image obtenue auprès de D.B. Sanders).

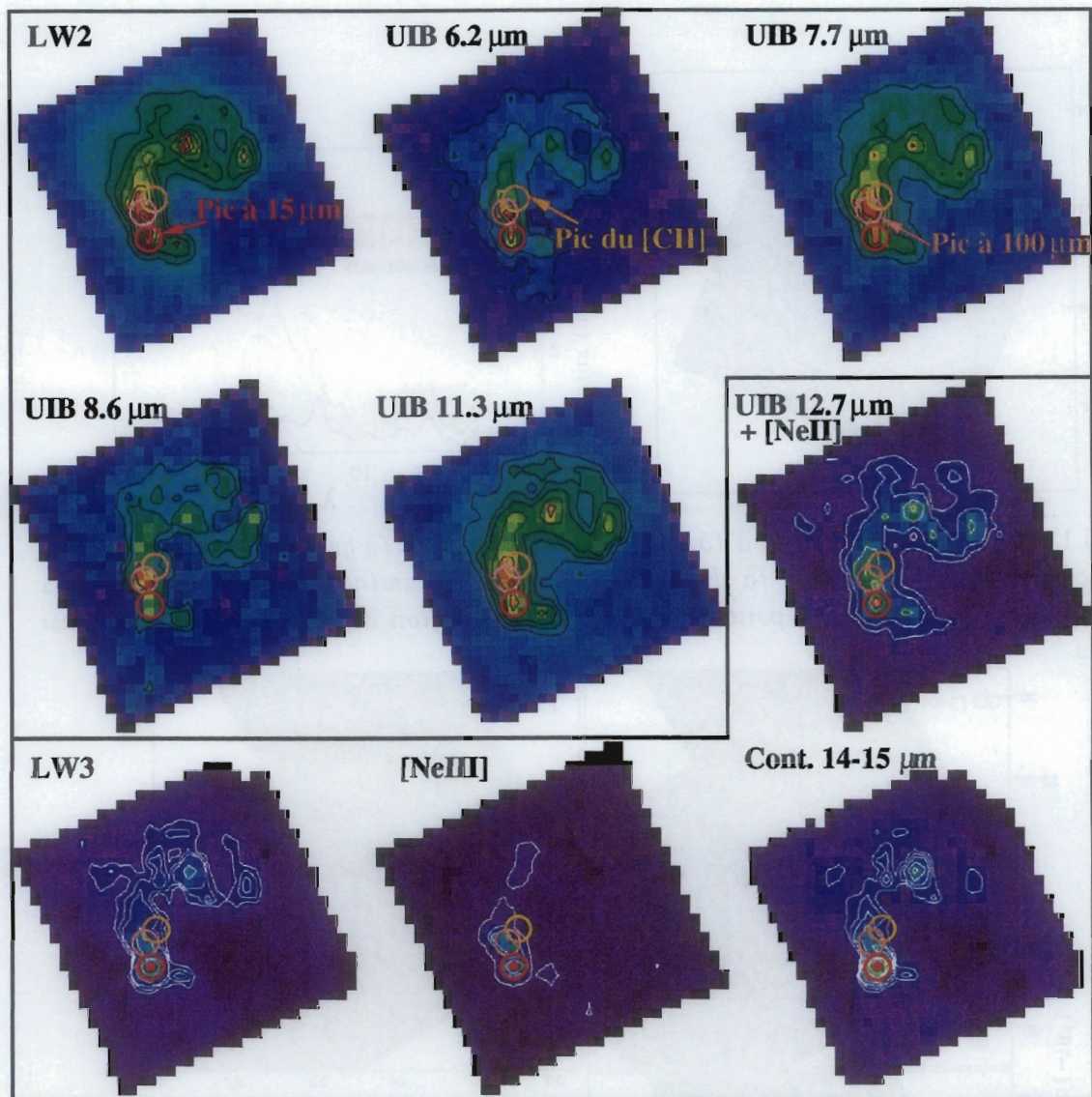


FIG. 5.3 – Cartes des différentes composantes spectrales (UIBs, raies, continuum) dans NGC 4038/39 obtenues à partir du mode spectro-imagerie d'ISOCAM. Le cercle rouge indique la position du starburst extra-nucléaire dominant à $15\mu\text{m}$. Le cercle rose précise la position du pic d'émission en infrarouge lointain et le cercle jaune celui de la raie [CII].

rouge lointain (Continuum + [CII]) sont en meilleur accord spatialement avec la carte LW2 (UIBs) par comparaison avec la carte LW3 (continuum des VSGs). La luminosité infrarouge provenant essentiellement de l'émission des gros grains en infrarouge lointain, ces données suggèrent que la source starburst à $15\mu\text{m}$ ne domine pas la luminosité infrarouge globale.

La diminution des UIBs dans la région starburst dominée en infrarouge moyen par un spectre HII pourrait également être due à une destruction partielle des UIBs par le rayonnement optique-UV responsable du fort continuum à $15\mu\text{m}$. Ceci nous rappelle

les spectres d'AGNs qui montrent une diminution quasi-totale des UIBs ainsi qu'une plus faible contribution dans l'infrarouge lointain à $450\ \mu\text{m}$ de la poussière. Les spectres starbursts et AGNs sont également caractérisés par de fortes raies du néon. La différence majeure se trouve dans la présence du fort continuum entre $5\text{--}16\ \mu\text{m}$ clairement visible en-dessous de $10\ \mu\text{m}$ qui est responsable de la diminution de la largeur équivalente des raies ioniques dans les AGNs (i.e. intensité de la raie divisée par son continuum).

5.3 Les galaxies à anneaux

Les galaxies à anneaux ont été découvertes avec la première observation de la très connue "Roue de chariot" ou "Cartwheel" en anglais (Zwicky, 1941). Plusieurs autres galaxies telles que Arp 10 et Arp 146 ont été incluses par la suite dans différents catalogues de galaxies particulières (Vorontsov-Velyaminov, 1959; Arp, 1966). Ces types de galaxies se forment à la suite de la collision d'une galaxie compagnon tombant sur une galaxie spirale perpendiculairement au plan du disque (voir Fig. 5.4, Lynds and Toomre, 1976). A la suite de cette collision, une onde de densité se forme dans le disque en provoquant une intense activité de formation d'étoiles dans l'anneau (Appleton and Marston, 1997). Cette activité starburst dans l'anneau a été observée dans l'infrarouge avec ISOCAM pour quelques galaxies: Cartwheel, Arp 10 et Arp 118. Nous avons étudié en particulier la galaxie "Cartwheel" considérée comme le prototype de galaxie à anneaux (pour plus de détails voir l'article en fin de chapitre, Charmandaris et al., 1999b). L'observation ISOCAM confirme la présence de formation d'étoiles dans l'anneau avec la détection à $7\ \mu\text{m}$ des régions les plus intenses en $\text{H}\alpha$ (Higdon, 1995). A $15\ \mu\text{m}$, on détecte seulement une petite fraction de l'anneau avec un rapport $\text{LW3}(15\ \mu\text{m})/\text{LW2}(7\ \mu\text{m}) = 5.2$ comparable à la région starburst la plus intense des Antennes. Cette région domine d'ailleurs l'émission à $15\ \mu\text{m}$ (60% de l'émission totale de la galaxie) avec une contribution plus faible à $7\ \mu\text{m}$ (24%). L'observation de cette galaxie nous fournit un autre exemple de starburst extra-nucléaire résultant de collisions produisant dans ce cas particulier des galaxies à anneaux.

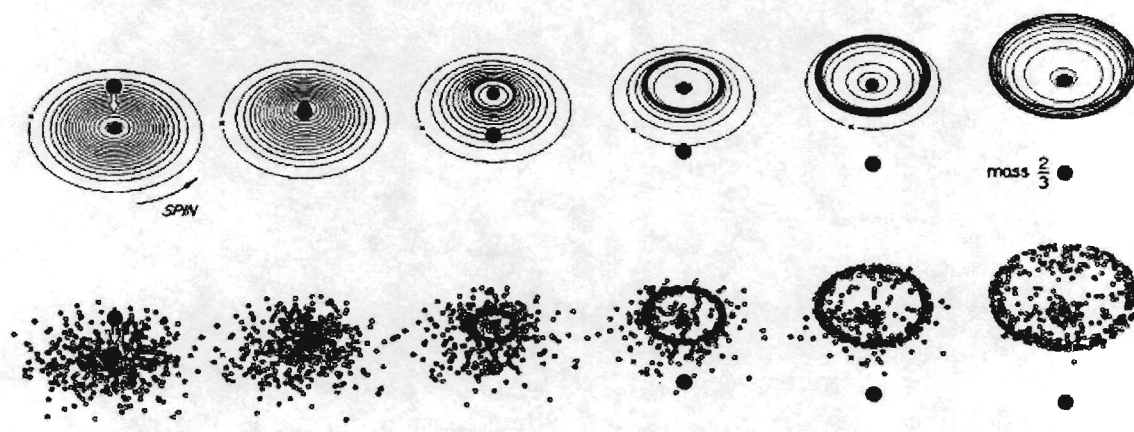


FIG. 5.4 – Modèles de formation des galaxies à anneaux obtenus par Lynds and Toomre, 1976. En haut, on a l'évolution d'un modèle de disque constitué par une masse centrale et 16 anneaux. En bas, le modèle est constitué de particules massives.

Arp 10 (=VV 362) est un autre exemple de galaxie à anneaux qui a été observé avec ISOCAM dans les filtres LW2($7\mu\text{m}$) et LW3($15\mu\text{m}$). Cette galaxie située à 122 Mpc ($H_0 = 75 \text{ km s}^{-1}$) présente un anneau extérieur brillant ainsi qu'un anneau interne plus faible mais très proche du noyau (Charmandaris et al., 1993). Les observations ISO-CAM révèlent clairement que l'émission en infrarouge moyen est associée avec l'anneau extérieur et le noyau (voir Fig. 5.5). La résolution spatiale ne permet pas de résoudre l'anneau interne. Le noyau contribue à 65% au flux total du système dans les deux filtres. Ceci est en accord avec l'activité de formation d'étoiles puisque la plupart du flux $H\alpha$ provient du noyau et de l'anneau interne (Charmandaris et al., 1993). On trouve dans l'ensemble de la galaxie un rapport $\text{LW3/LW2} \sim 1.1$ identique à celui des galaxies spirales "normales" (sans starburst et sans AGN dominant). Les valeurs extrêmes trouvées dans "Cartwheel" n'ont pas d'équivalent dans Arp 10. Ceci pourrait être due à une plus faible activité de formation d'étoiles ($\sim 5.5 M_\odot \text{ an}^{-1}$). L'observation de ces deux galaxies montre qu'il est possible sous certaines conditions de produire des régions starbursts très éloignées du noyau de la galaxie. Pour Cartwheel et Arp 10, les régions starbursts dans l'anneau sont au moins à 15 kpc du centre de la galaxie. Cette distance est bien supérieure à celle du starburst extra-nucléaire des Antennes situé à environ 2 kpc du noyau de NGC 4039.

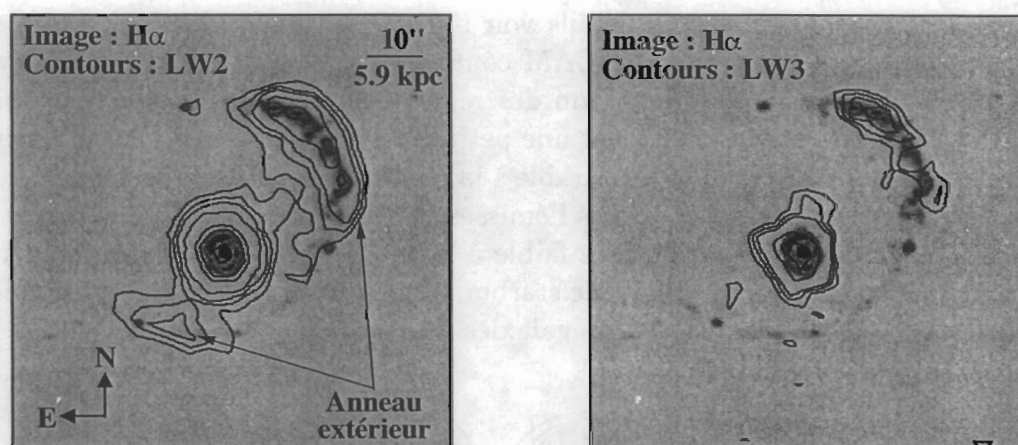


FIG. 5.5 – Carte $H\alpha$ de Arp 10 avec les contours à $7\mu\text{m}$ (à gauche) et $15\mu\text{m}$ (à droite).

5.4 Les galaxies ultralumineuses

Les galaxies les plus lumineuses ($L_{\text{IR}} > 10^{12} L_\odot$) dans l'univers local ($z < 0.3$) appelées aussi galaxies infrarouges ultralumineuses¹ émettent la plus grande partie de leur énergie aux longueurs d'onde infrarouge (Soifer et al., 1989; Sanders and Mirabel, 1996). Dans ces galaxies, l'émission infrarouge semble provenir des régions nucléaires où les deux galaxies sont dans un état d'interaction avancée (distance entre les deux noyaux

1. "Ultraluminous Infrared Galaxies (ULIRG)" en anglais.

< 10 kpc). Il n'est cependant pas exclu de trouver des régions starbursts intenses en-dehors du noyau (ex: Arp 299 que nous verrons par la suite). La présence d'une grande quantité de gaz moléculaire ($M(\text{H}_2) \sim 10^{10} M_\odot$) a été détectée dans les régions centrales de ces galaxies (Mirabel et al., 1990; Sanders et al., 1991). La grande quantité de poussières associées au gaz provoque une forte absorption dans l'optique et l'UV. Pour l'ensemble de ces raisons (extinction + compacité de l'émission), on n'a pas encore pu déterminer clairement si la source dominante d'énergie responsable de l'émission bolométrique est produite par les starbursts ou par l'AGN. En général, on pense trouver un mélange d'AGN (Sanders et al., 1988) et de régions starbursts compactes (Condon et al., 1991), le tout accompagné d'une forte concentration de gaz moléculaire.

Les observations dans l'infrarouge ont le grand avantage par rapport à celles dans le visible d'être beaucoup moins affectées par l'extinction. De plus, comme on a pu le voir dans les chapitres précédents, les propriétés spectrales dans l'infrarouge moyen des AGNs et des starbursts sont clairement distinctes. On a ainsi la possibilité, avec ISOCAM, de sonder plus en profondeur des galaxies actives pour détecter la présence ou non des signatures de l'AGN. Deux exemples de galaxies ultralumineuses sont présentés ici: Arp 220 et IRAS 19254-7245 ("The Super-Antennae"). Pour finir ce chapitre sur les galaxies en interaction, je présenterai les observations de Arp 299 qui est un système en interaction très proche assez semblable aux galaxies ultralumineuses ($L_{\text{IR}} = 5.2 \times 10^{11} L_\odot$, Soifer et al., 1987b)

5.4.1 Le prototype de galaxie ultralumineuse : Arp 220

Arp 220 est l'objet le plus lumineux dans l'univers local avec $L_{\text{bol}} = 1.2 \times 10^{12} L_\odot$. C'est un système en état avancé d'interaction avec comme signature caractéristique la présence de deux queues de marée (Joseph and Wright, 1985). Grâce à sa relative proximité pour une telle luminosité (77 Mpc avec $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$), cette galaxie a fait l'objet de nombreuses études multi-longueurs d'onde. Sa région nucléaire est obscurcie dans l'optique, mais deux noyaux séparés par $0.98''$ (~ 364 pc) sont clairement résolus dans l'infrarouge proche (Graham et al., 1990; Scoville et al., 1998) et dans le domaine radio (Norris, 1988). L'émission CO est concentrée au centre entre les deux noyaux (Scoville et al., 1997) alors que le gaz HI est vu en émission seulement en-dehors des régions centrales (Hibbard and Yun, 1996). Le rapport total $L_{\text{IR}}/M(\text{H}_2)$ est égal à $\sim 100 L_\odot/M_\odot$ ce qui est environ 20 fois celui de notre galaxie.

Sur la figure 5.6, on a représenté le spectre CVF de 5 à $16 \mu\text{m}$ de Arp 220. Son spectre se distingue essentiellement par une forte absorption se traduisant par un faible flux détecté dans la bande des silicates à $9.7 \mu\text{m}$ (voir aussi Smith et al., 1989).

L'absorption est également responsable de la très nette diminution des UIBs à 6.2, 8.6 et $11.3 \mu\text{m}$ par rapport à celle à $7.7 \mu\text{m}$. Le continuum domine l'émission au-delà de $10 \mu\text{m}$ mais semble être négligeable à courtes longueurs d'onde ($< 10 \mu\text{m}$). Il est donc très semblable au continuum rencontré dans les régions starbursts telles que le noyau de NGC 253. Un corps noir de température similaire ($T \sim 200$ K), mais absorbé avec $A_V = 94$ au lieu de $A_V = 19$ pour le noyau de NGC 253, permet de rendre compte de la forme du continuum (voir Fig. 5.7). Les spectres ISOCAM et ISOPHOT-S sont très proches en terme de photométrie ($\sim 20\%$) ce qui nous conforte dans la confiance à

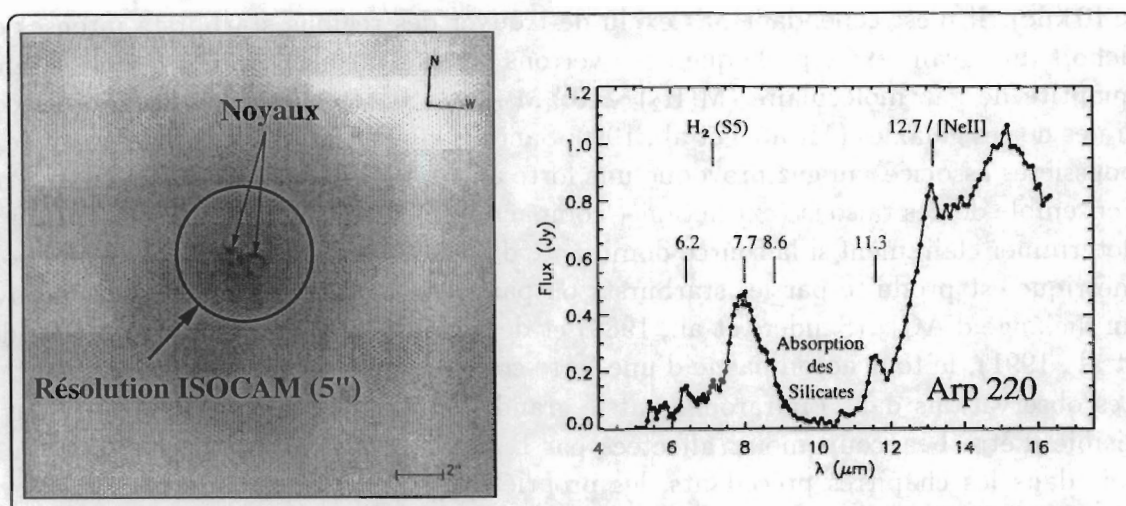


FIG. 5.6 – Image du télescope spatial Hubble (à gauche) et spectre CVF de Arp 220 (à droite). Sur l'image optique du HST, on distingue clairement les deux noyaux séparés de $\sim 1''$ qui sont non-résolus avec ISOCAM. Le spectre est intégré sur la galaxie Arp 220 entre 5 et $16\mu\text{m}$. Les principales UIBs sont notées à 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 et $12.7\mu\text{m}$. Une forte extinction est responsable de la faible UIB à $11.3\mu\text{m}$ ainsi que de la quasi-disparition de l'UIB à $8.6\mu\text{m}$.

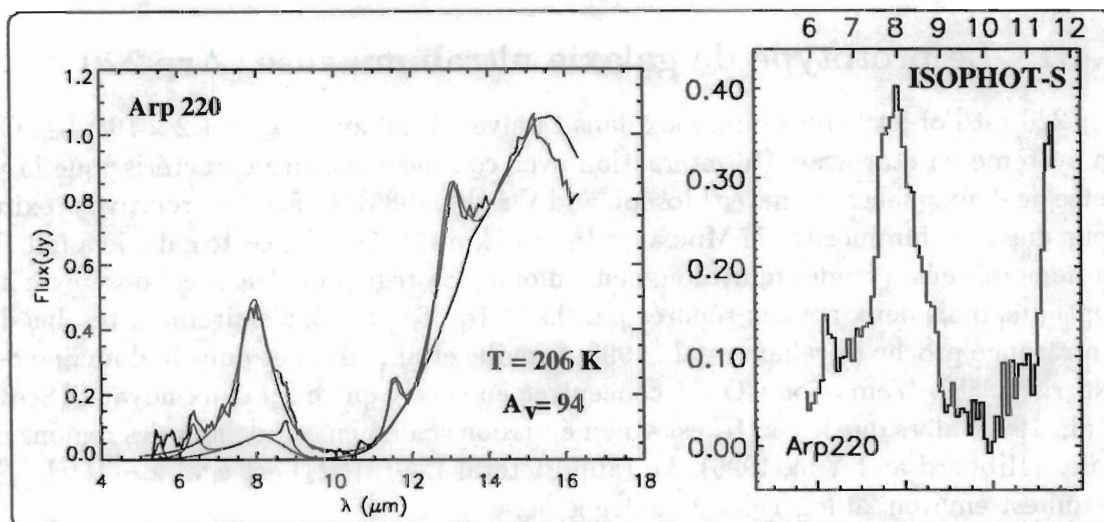


FIG. 5.7 – Spectres de Arp 220 avec ISOCAM (à gauche) et ISOPHOT-S (à droite, Genzel et al., 1998a). Le continuum du spectre ISOCAM est reproduit par un corps noir à $T \sim 206\text{ K}$. L'absorption atteint 9.4 mag en utilisant un modèle d'écran. Le spectre ISOPHOT-S entre 5.8 et $11.6\mu\text{m}$ est comparable à $\sim 20\%$ près à celui obtenu avec ISOCAM.

accorder aux résultats obtenus avec ces deux instruments. Il est intéressant de noter que l'observation entre 6 et $12\mu\text{m}$ ne permet pas d'estimer l'importance du continuum à $14\text{--}16\mu\text{m}$. L'importance relative de ce continuum par rapport aux UIBs nous donne un indicateur d'activité starburst. Dans le cas d'Arp 220, le rapport classique

LW3(12-18 μm)/LW2(5-8.5 μm) est égal à 5 ce qui est similaire aux régions les plus actives observées jusqu'à présent comme dans les Antennes ou dans Cartwheel. L'absence de continuum à 5-10 μm exclut une forte contribution provenant d'un AGN dans l'infrarouge moyen. On ne peut néanmoins exclure sa présence en contribuant minoritairement à l'émission entre 5 et 16 μm . De plus, une forte absorption peut également cacher un AGN en diminuant considérablement l'intensité du continuum à 5 μm qui est utilisée comme critère pour estimer l'émission de l'AGN. Ainsi du point de vue de l'infrarouge moyen, Arp 220 est dominée par l'activité starburst (voir aussi Smith et al., 1998b). On peut considérer Arp 220 comme le prototype des galaxies ultralumineuses starbursts.

5.4.2 La galaxie "Les Super-Antennes" (IRAS 19254-7245)

La galaxie ultralumineuse infrarouge IRAS 19254-7245, aussi appelée "Super-Antennes", résulte de la collision de deux galaxies spirales riches en gaz, actuellement séparées de 10 kpc en projection. Elle est caractérisée par deux grandes queues de marée d'une extension totale de 350 kpc (Mirabel et al., 1991). A partir de spectres optiques, la galaxie sud est classifiée comme Seyfert 2 (FWHM $\sim 1700 \text{ km.s}^{-1}$) (Mirabel et al., 1991, Duc et al., 1997). La galaxie nord présente un spectre optique correspondant plus à une activité starburst ou LINER (Colina et al., 1991). Des observations du sol ont déjà montré que plus de 80 % du flux total à 10 μm (bande N) provient de la galaxie Seyfert 2. Sur la figure 5.8, les deux galaxies sont nettement identifiables à 7 μm . C'est également la galaxie du sud, contenant un AGN identifié en optique, qui domine l'émission totale dans l'infrarouge moyen. A 15 μm , elle représente 98 % de l'émission intégrée de IRAS 19254-7245. Après avoir soustrait la contamination de la PSF de la galaxie active (à gauche) sur la galaxie starburst (à droite), les deux SEDs de chaque galaxie montrent des caractéristiques bien distinctes (voir table 5.1 pour les flux). La contri-

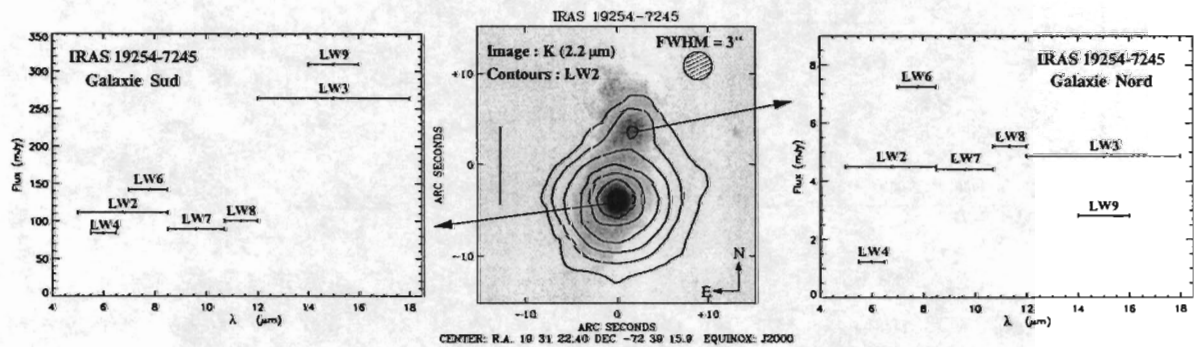


FIG. 5.8 – Distributions spectrales d'énergie des deux galaxies des "Super-Antennes". Au milieu, la carte de contours à 7 μm (LW2) est superposée sur une image à 2.2 μm (Duc et al., 1997). Les contours sont à 5 σ , 10 σ , 20 σ , 40 σ , 80 σ et 160 σ avec $\sigma = 0.025 \text{ mJy/pixel}$. Les SEDs de chaque galaxie sont composées de 7 filtres larges centrés sur les UIBs (LW2, LW4, LW6, LW8), sur la zone d'absorption par les silicates (LW7) et sur le continuum à 15 μm (LW3, LW9).

bution relative des UIBs à $5\text{--}8.5\mu\text{m}$ par rapport au continuum est plus faible dans la galaxie active (sud) indiquant en conséquence une plus forte activité starburst ou une importante contribution AGN. Le continuum qui domine l'émission possède également une importante composante à courtes longueurs d'onde ($< 10\mu\text{m}$) ce qui favorise l'hypothèse de l'AGN.

Noms IRAS	LW2 (mJy)	LW3 (mJy)	LW4 (mJy)	LW6 (mJy)	LW7 (mJy)	LW8 (mJy)	LW9 (mJy)
19254-7245(S)	111.5 ± 2.0	264.0 ± 4.4	84.1 ± 2.8	142.1 ± 3.1	89.4 ± 3.0	100.4 ± 2.8	309.3 ± 3.7
19254-7245(N)	4.5 ± 0.8	4.9 ± 2.6	1.2 ± 1.1	7.2 ± 1.3	4.4 ± 1.3	5.2 ± 1.4	2.8 ± 2.3

TAB. 5.1 – Flux intégrés pour chaque galaxie de IRAS 19254-7245. Les erreurs données pour chaque flux ont été estimées à partir de la carte rms pour 3σ . L'incertitude sur les flux absolus est estimée à $\pm 20\%$. Les symboles (S) et (N) représentent respectivement les galaxies situées au Sud et au Nord.

Il est évidemment difficile de définir la forme du spectre uniquement sur la base des filtres larges. Cependant, en utilisant les spectres CVF déjà observés dans d'autres objets, on peut à l'inverse estimer l'intensité des filtres larges LW. Il ne reste plus qu'à trouver le bon spectre CVF rendant compte de la distribution des 7 filtres larges. A noter, dans le cas présent, que la solution doit être unique puisque les 7 filtres permettent d'estimer le continuum ainsi que la contribution des UIBs. On ne peut évidemment pas retrouver les raies ioniques du néon qui sont noyées dans le continuum au travers du filtre large LW3. Sur la figure 5.9, on peut reproduire la SED à 7 filtres de IRAS 19254-7245 avec le spectre de NGC 1068 pour la galaxie Sud et le spectre d'une région faiblement active en formation d'étoiles pris dans le disque de M 82 pour la galaxie Nord. Le spectre ISOPHOT est d'ailleurs similaire à celui de NGC 1068 au niveau de l'intensité relative des UIBs.

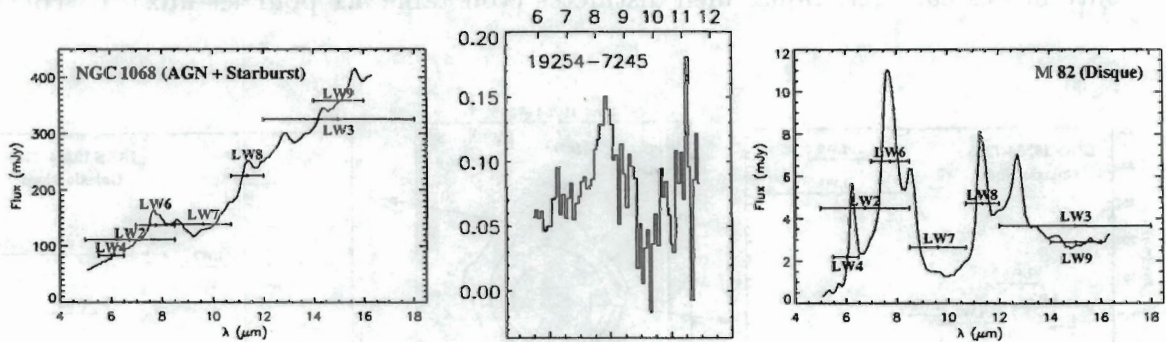


FIG. 5.9 – Modèles de spectres pour les deux galaxies des "Super-Antennes". La galaxie active sud présente une SED comparable à celle de NGC 1068 avec $\sim 70\text{--}80\%$ de contribution AGN (à gauche). La galaxie starburst nord montre une SED similaire à celles des disques galactiques comme dans le disque de M 82 (à droite). Les deux spectres ont été normalisés avec les flux LW2 des deux galaxies de IRAS 19254-7245. On peut noter que le spectre intégré des "Super-Antennes" obtenu avec ISOPHOT-S (Genzel et al., 1998a), est comparable à celui de NGC 1068 entre $6\text{ à }8\mu\text{m}$ pour ce qui concerne le continuum et l'intensité des UIBs. La région d'absorption des silicates à $9\text{--}11\mu\text{m}$ est plus prononcée pour IRAS 19254-7245.

Cette galaxie est classée comme "warm" avec $f_{25}/f_{60} > 0.2$ ce qui rend plus probable une contribution AGN importante dans l'infrarouge à la différence d'Arp 220 avec $f_{25}/f_{60} = 0.08$ (de Grijp et al., 1985). L'émission de la galaxie IRAS 19254-7245 est ainsi probablement dominée dans l'infrarouge moyen par l'activité liée à l'AGN à 70-80 % ce qui fait de ce système, le prototype de galaxie ultralumineuse dominée par un noyau actif, la contribution de la galaxie nord étant négligeable.

Parmi les galaxies ultralumineuses, nous avons jusqu'à présent défini un prototype dominé par le starburst (Arp 220) et un autre dominé par l'AGN (IRAS 19254-7245). Dans la section suivante, nous allons étudier un système en interaction très intéressant Arp 299, résolu en plusieurs sources aux propriétés spectrales très distinctes.

5.4.3 Un système de galaxies en interaction : Arp 299

A une distance de 42 Mpc ($H_0 = 75 \text{ km s}^{-1}$), Arp 299 (Mrk 171 = IC 694 + NGC 3690) est un des systèmes de galaxies en interaction le plus proche. Arp 299 est l'objet le plus lumineux dans un rayon de 50 Mpc ($L_{IR} = 5 \times 10^{11} L_{\odot}$). Sa proximité ainsi que ses dimensions (8 kpc) en font un candidat idéal pour explorer les effets de l'activité de formation d'étoiles provoqués par une interaction. Arp 299 a déjà fait l'objet d'études en optique (Augarde and Lequeux, 1985; Friedman et al., 1987; Hibbard and Yun, 1999, infrarouge (Gehrz et al., 1983; Gallais, 1991; Wynn-williams et al., 1991; Zhou et al., 1993; Keto et al., 1997; Satyapal et al., 1999), radio (Gehrz et al., 1983; Aalto et al., 1997; Zhao et al., 1997; Casoli et al., 1999) et en X (Heckman et al., 1999). Ce système de galaxies en interaction comprend 2 disques de galaxies hautement perturbés IC 694 à l'est et NGC 3690 à l'ouest. Une queue de marée s'étend à 180 kpc des deux galaxies (voir Fig. 5.10, Hibbard and Yun, 1999). Les deux galaxies se caractérisent par deux noyaux à l'est (source A) et au sud-ouest (source B = B1+B2), et deux régions extra-nucléaires au nord-ouest (source C, C').

Détection de 4 sources avec ISOCAM.

ISOCAM est particulièrement bien adaptée pour observer ce type d'objet très obscurci par la poussière, la résolution spatiale permettant de résoudre distinctement les 4 sources principales. Arp 299 a été observée en mode CVF entre 5 et $16 \mu\text{m}$ avec un champ de vue de $48''$ permettant d'étudier l'ensemble du système. Sur la figure 5.10 à droite, les contours de l'image intégrée entre 5 et $8.5 \mu\text{m}$ (LW2) ont été superposés à une image optique prise avec le HST.

La source A complètement obscurcie en optique par une bande de poussière est clairement détectée à $7 \mu\text{m}$. Cette source ponctuelle correspond en position au pic radio détecté à 6 cm et 20 cm par Gehrz et al. (1983).

Les sources C et C' sont très probablement des régions extra-nucléaires de formation d'étoiles comme le point chaud des Antennes dans la zone de recouvrement des disques. Les spectres ISOCAM sont d'ailleurs très similaires à celui de cette région starburst

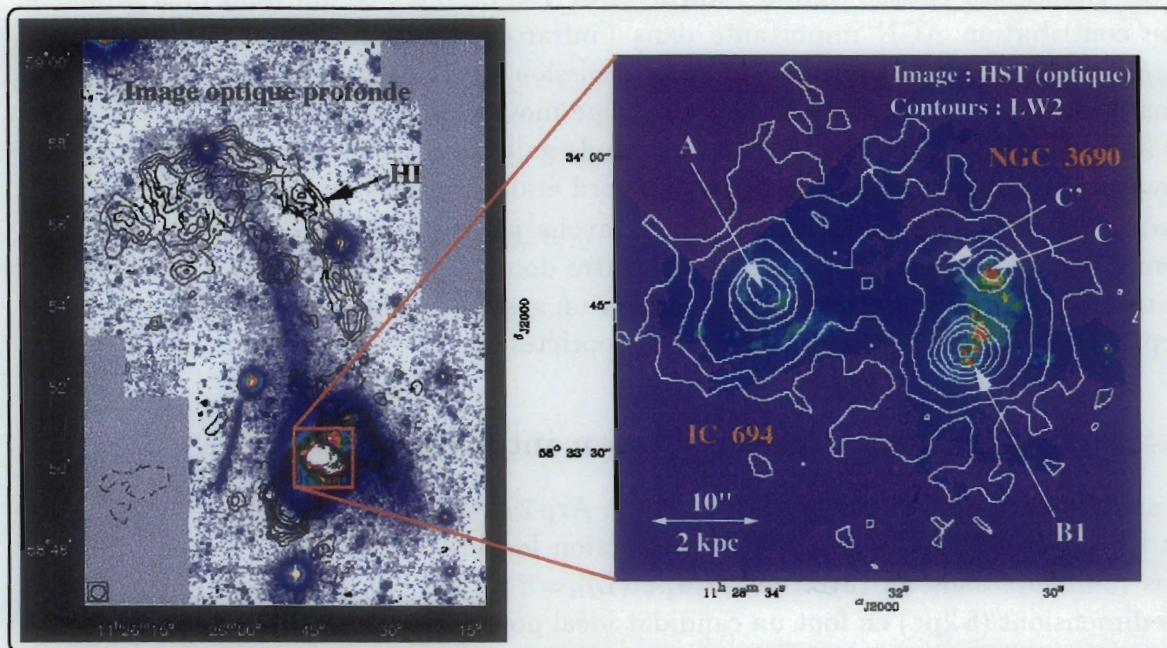


FIG. 5.10 – Observations optique et infrarouge de Arp 299. A gauche, une image profonde optique révèle la présence d'une queue de marée de longueur totale de 180 kpc (Hibbard and Yun, 1999). A droite, les contours de l'image ISOCAM intégrée dans la bande LW2 (5-8.5 μm) ont été superposés sur l'image optique HST. Les contours ont pour valeur 3σ , 6σ , 12σ , 24σ , 35σ , 53σ , 80σ , 130σ avec $\sigma = 0.37 \text{ mJy/pixel}$ (1 pixel = 1.5 arcsec). Les quatre sources résolues par ISOCAM sont notées A, B1, C et C' selon les conventions usuelles.

des Antennes.

La source B dans NGC 3690 est composée de plusieurs régions observées en optique et en infrarouge proche (Gallais, 1991; Wynn-williams et al., 1991; Gallais et al., 1999). Elle est composée d'au moins deux sources principales (B1 et B2). La source Nord (B2) coïncide avec la source étendue observée par le HST en optique et présente des indices de couleur en proche infrarouge typiques d'une population d'étoiles évoluées. La source sud est par contre extrêmement rouge et domine l'émission à 3.8 μm en bande L (voir Fig. 5.11). C'est précisément cette source qui coïncide avec le pic d'émission dans l'infrarouge moyen et qui domine l'émission de NGC 3690. La position du noyau est encore ambiguë:

- D'une part, la forte composante stellaire dans B2 qui domine l'émission en optique supporte l'hypothèse que B2 est le noyau de la galaxie. Dans ce cas, B1 serait une région extra-nucléaire extrême de formation d'étoiles avec $L_{\text{IR}} \sim 3.2 \times 10^{11} L_{\odot}$ (Joy et al., 1989).
- D'autre part, la distribution de gaz CO et HCN (traceur de gaz dense) est concentrée essentiellement sur la source B1 comme pour A. De plus, un fort gradient de vitesse est observé autour de B1 qui deviendrait ainsi le centre dynamique du

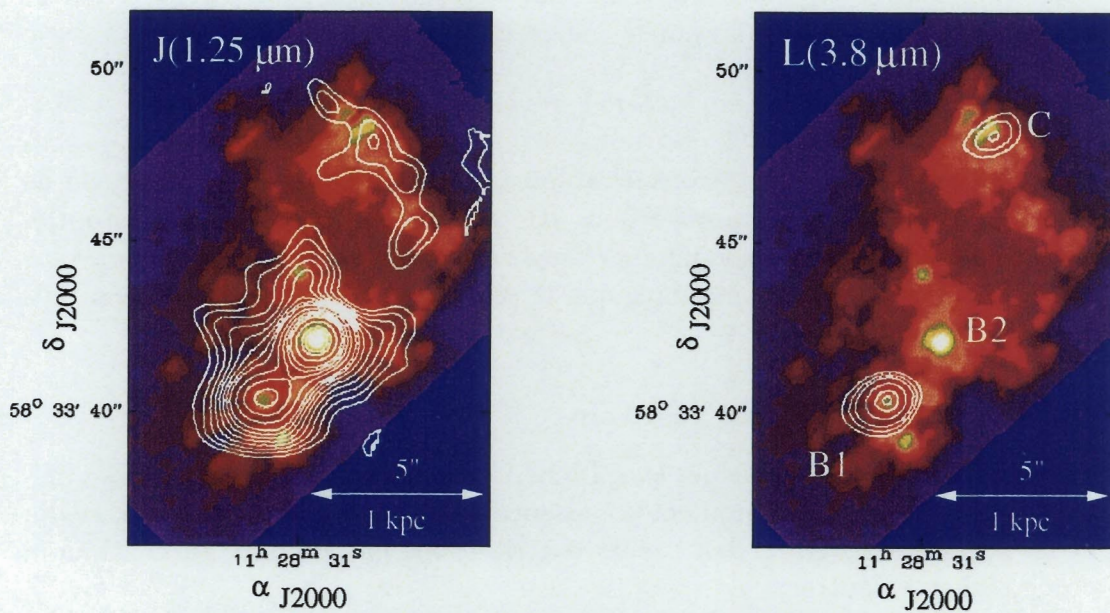


FIG. 5.11 – Image *HST* optique de NGC 3690 avec les contours en proche infrarouge dans les bandes J et L (Gallais, 1991, Gallais et al., 1999). On voit clairement que la région B1 domine l'émission à grande longueur d'onde alors que B2, qui possède une signature spectrale d'étoiles évoluées, disparaît à $3.6\mu\text{m}$.

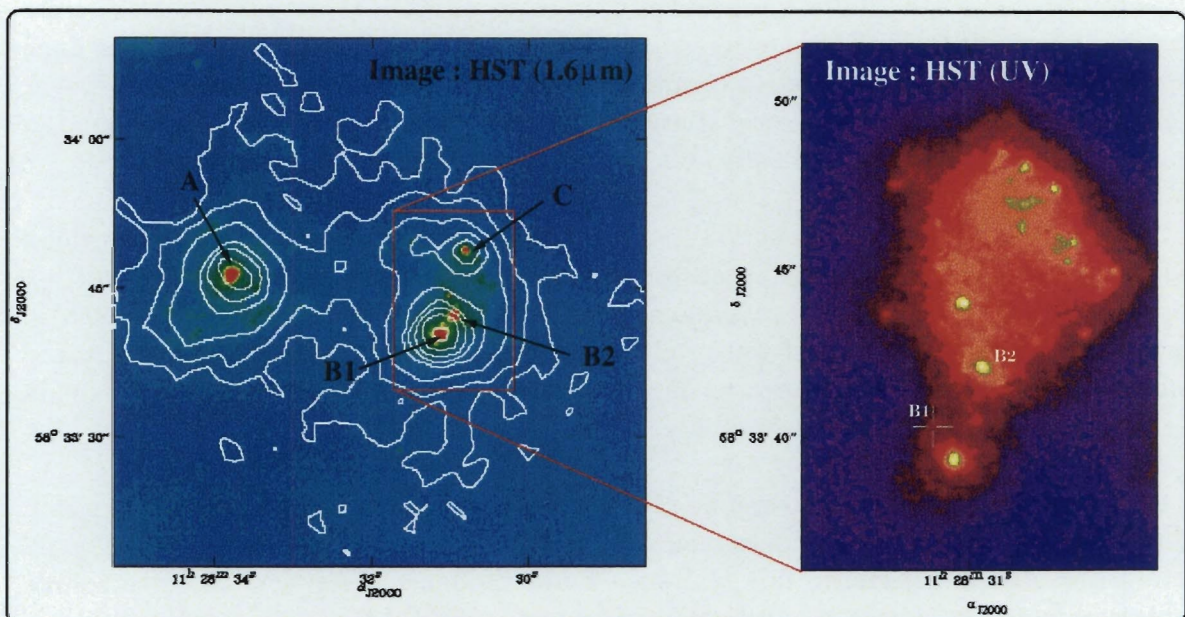


FIG. 5.12 – Comparaison de l'image *HST* dans l'infrarouge proche avec NICMOS à $1.6\mu\text{m}$ avec les contours ISOCAM à $5-8.5\mu\text{m}$ (à gauche). A droite, la source B1 n'est plus visible sur l'image UV de NGC 3690 obtenue avec l'instrument "FOC" du *HST*.

système et donc le noyau (Casoli et al., 1999). Le spectre infrarouge montre des propriétés spectrales très proches d'un AGN très obscurci ce qui définitivement confirmerait le rôle de noyau pour la source B1.

Sur la figure 5.12, l'image à $2.2\mu\text{m}$ du HST révèle la présence de la source A obscurcie en optique. Dans NGC 3690, B1 domine maintenant l'émission par rapport à B2. La contribution stellaire chute considérablement dans B2 alors que l'émission de la poussière augmente dans l'infrarouge pour B1. A ces deux effets liés aux propriétés intrinsèques de l'émission se conjugue l'effet de l'absorption qui est beaucoup plus intense dans B1. On peut d'ailleurs noter que la source B1 n'est pas détectée en UV (image de droite sur la figure 5.12).

Etude des 4 spectres ISOCAM (5-16 μm).

Sur la figure 5.13, les 4 sources résolues avec ISOCAM possèdent des spectres très différents. Chaque spectre montre clairement la présence d'UIBs que l'on associe aux PDRs entourant les régions HII. Cependant, leurs contributions par rapport au continuum varient d'une région à l'autre.

- Le spectre de la source A est très caractéristique des régions starbursts cachées par leurs contenus en poussière. Celle-ci provoque de faibles UIBs à $11.3\mu\text{m}$ et $8.6\mu\text{m}$ ainsi qu'une forte diminution du continuum entre 9 et $12\mu\text{m}$. L'importante extinction par les silicates se traduit aussi par une diminution du flux au delà de $16\mu\text{m}$ où se trouve la deuxième bande d'absorption centrée à $18\mu\text{m}$. Le continuum à $5\mu\text{m}$ est faible ce qui suggère que la contribution provenant d'un supposé AGN (Gehrz et al., 1983) n'est pas dominante dans l'infrarouge moyen. L'absorption est de l'ordre de 100 mag dans l'optique en utilisant un modèle d'écran. On peut tout à fait comparer ce spectre avec celui de la galaxie ultralumineuse starburst Arp 220 (voir Fig. 5.14). A noter que la non détection de la [NeIII] ($15.6\mu\text{m}$) est peut-être due à cette même extinction.

- Les spectres des sources C et C' associées aux régions de recouvrement des deux disques galactiques présentent d'intenses raies ioniques avec un rapport $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}] \sim 1$ caractéristique d'un champ de rayonnement produit par des étoiles OB de 50 à $60 M_{\odot}$. Le continuum croissant à $14\text{-}15\mu\text{m}$ produit par les VSGs est cependant moins absorbé que celui de la source A. Le spectre de C est très semblable à celui rencontré dans la région starburst des Antennes (voir Fig. 5.14).

- La source B1 est certainement la plus intéressante parmi les objets de Arp 299. Elle présente des propriétés spectrales très particulières pour un starburst selon la littérature. Aucun article ne fait référence à une évidence d'AGN dans cette source contrairement à la source A. Cependant, le spectre ISOCAM ne permet de trancher définitivement pour un spectre de "pur" starburst. Différents arguments suggèrent la présence d'une contribution AGN dans l'infrarouge moyen.

1. La forme des 3 UIBs à 6.2, 7.7 et $8.6\mu\text{m}$ est très différente de celle observée dans l'ensemble des spectres starbursts de notre échantillon. Les UIBs sont généralement bien

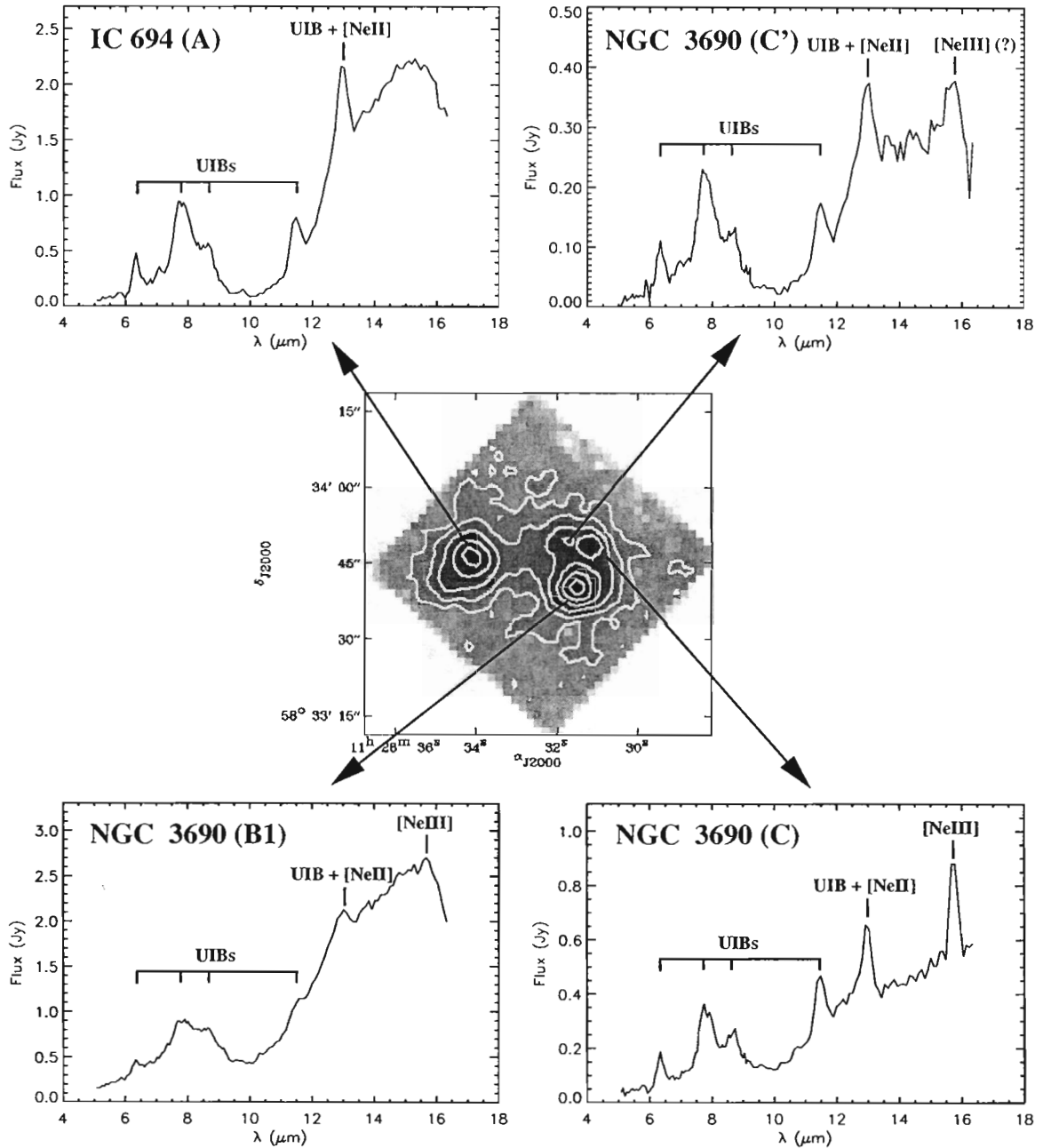


FIG. 5.13 – Spectres ISOCAM des différentes régions de Arp 299.

séparées et contrastées comme dans le cas des régions starbursts A, C et C'. Même dans des starbursts très affectés par l'absorption des silicates comme Arp 220, on sépare très nettement l'UIB la plus intense à $7.7\ \mu\text{m}$ par rapport au continuum. Les UIBs de la source B1 pourraient être diluées dans un fort continuum sous-jacent. Pour tester cette hypothèse, nous avons tenté de soustraire une composante UIB caractéristique d'un starburst. Sur la figure 5.15, nous utilisons deux spectres starbursts différents provenant de A et C. Ils se distinguent essentiellement par leur continuum à $9\text{--}16\ \mu\text{m}$. Le but recherché va être de soustraire une composante UIB du spectre de B1 pour obtenir le

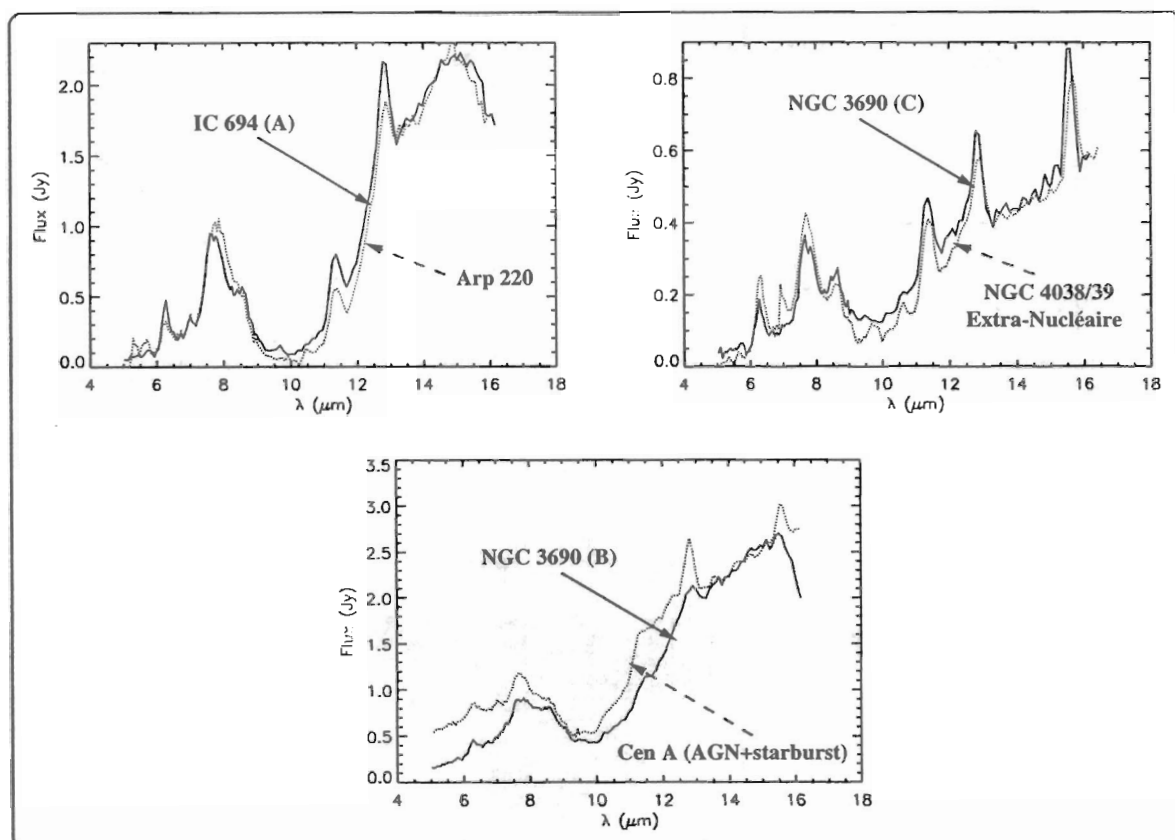


FIG. 5.14 – Comparaison des spectres de Arp 299 avec des spectres prototypes. L'ensemble des spectres ont été normalisés au continuum à 14-15 μm . Le spectre de IC 694 (en haut à gauche) est très semblable à celui de Arp 220 qui représente le prototype de starburst très obscurci ($A_V \sim 100$ mag avec un modèle d'écran). Le spectre NGC 3690 (C) (en haut à droite) peut se comparer à celui de la région starburst dans la galaxie des "Antennes" ($18'' \times 18''$). Le spectre de NGC 3690 (B1) (en bas) où l'on soupçonne la présence d'un AGN est relativement proche du spectre de Cen A incluant des régions starbursts circum-nucléaires.

continuum sous-jacent. A droite, on peut voir le spectre B1 initial ainsi que les résultats de la décomposition. Dans les deux spectres résultants, l'absence d'UIBs à 6.2, 7.7 et 8.6 μm indique que la méthode de soustraction est satisfaisante ce qui implique également que la forme des UIBs est indépendante du continuum. Les spectres obtenus par cette méthode montrent encore un continuum important à courtes longueurs d'onde (5-10 μm). Ce continuum ressemble au 1^{er} ordre à celui de l'AGN observé dans Cen A, à ceci près que l'absorption semble être plus importante pour B1, ce qui diminue sensiblement le continuum entre 5 et 8 μm . Dans ce cas, la difficulté majeure est de savoir si une région HII peut produire un tel continuum. D'après l'ensemble des spectres HII comme M 17 et II Zw 40 (voir Fig. 2.3 et 3.19), il semble très difficile de reproduire un tel continuum avec des régions HII. Pour cette raison, le spectre ISOCAM suggère la présence d'un AGN dans B1. Si on assimile le continuum résiduel à l'AGN, on trouve qu'environ 70 % de la luminosité entre 5 et 16 μm dans B1 provient du noyau actif (30 % de starburst similaire à C et 28 % pour A).

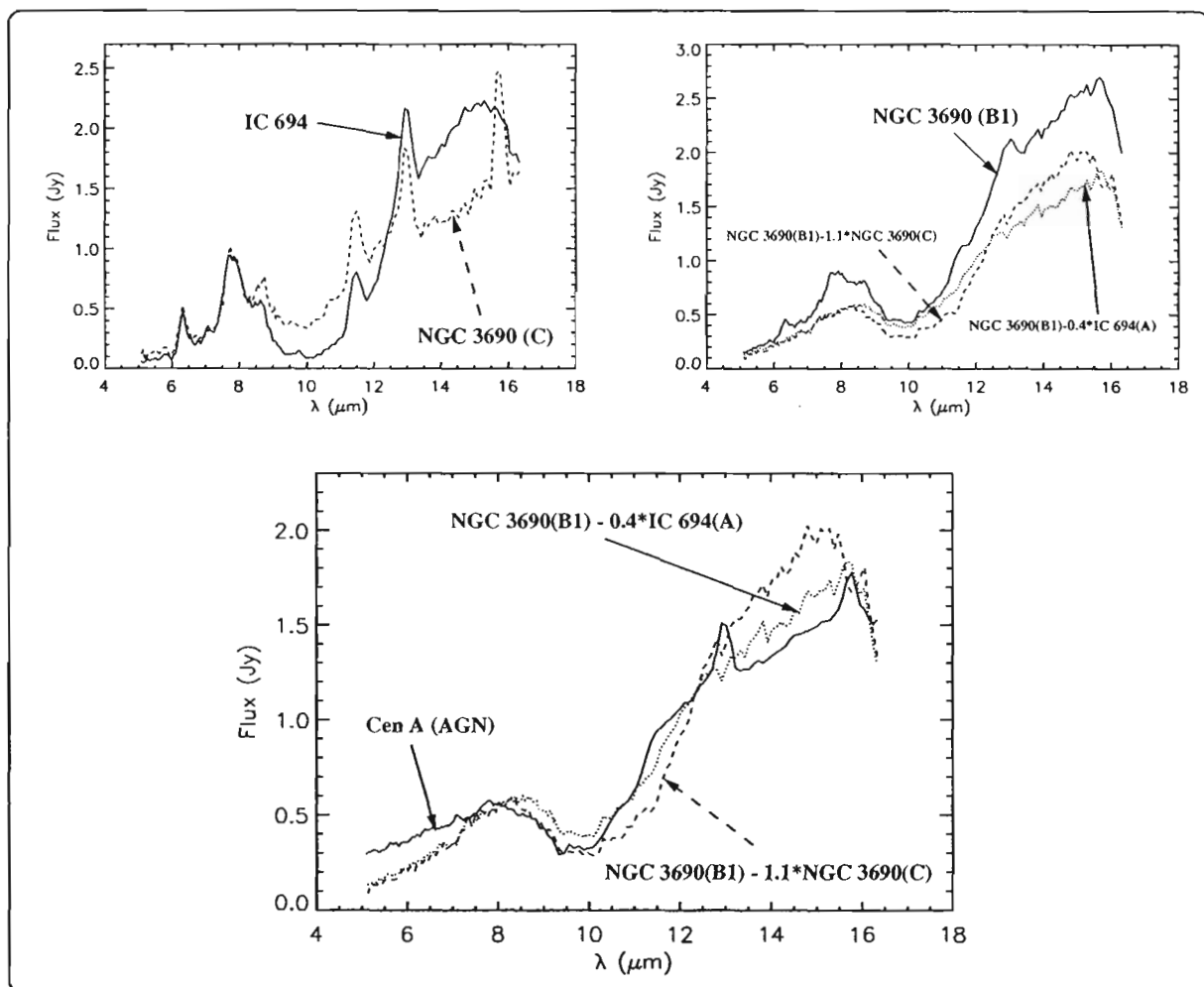


FIG. 5.15 – Décomposition spectrale du spectre de la source B1. En haut à gauche, les spectres de A et de C sont superposés après avoir été normalisés à $7.7\mu\text{m}$. En haut à droite, on peut voir le spectre B1 superposé au résultat de la soustraction d'une composante starburst semblable à A ou C. En bas, on compare les deux continua obtenus précédemment avec le continuum de l'AGN de Cen A.

2. Cette augmentation du continuum en infrarouge moyen a également été observée par Joy et al. (1989) et par Gerh et al. (1983). Sur la figure 5.16, la source A domine l'émission dans l'infrarouge lointain (60 et $100\mu\text{m}$) alors que la source B devient dominante en dessous de $20\mu\text{m}$. Cet écart est d'ailleurs maximum à $3.6\mu\text{m}$ où le continuum supposé provenir de l'AGN devient prépondérant dans B. En termes de couleurs IRAS où le rapport $f_{25}/f_{60} > 0.2$ sélectionne essentiellement les AGNs, on obtient $f_{25}/f_{60} = 0.20$ pour l'ensemble de la galaxie Arp 299 (Soifer et al., 1989). On en déduit que la source B1 qui domine en-dessous de $20\mu\text{m}$ doit avoir un rapport $f_{25}/f_{60} > 0.2$. Par contre, la source A dominante au-delà de $20\mu\text{m}$ présente nécessairement un rapport $f_{25}/f_{60} < 0.2$. Les couleurs IRAS sélectionnant la contribution AGN/Starburst sont ainsi en parfait accord avec la présence d'un AGN dans B1 et d'un starburst dans A.

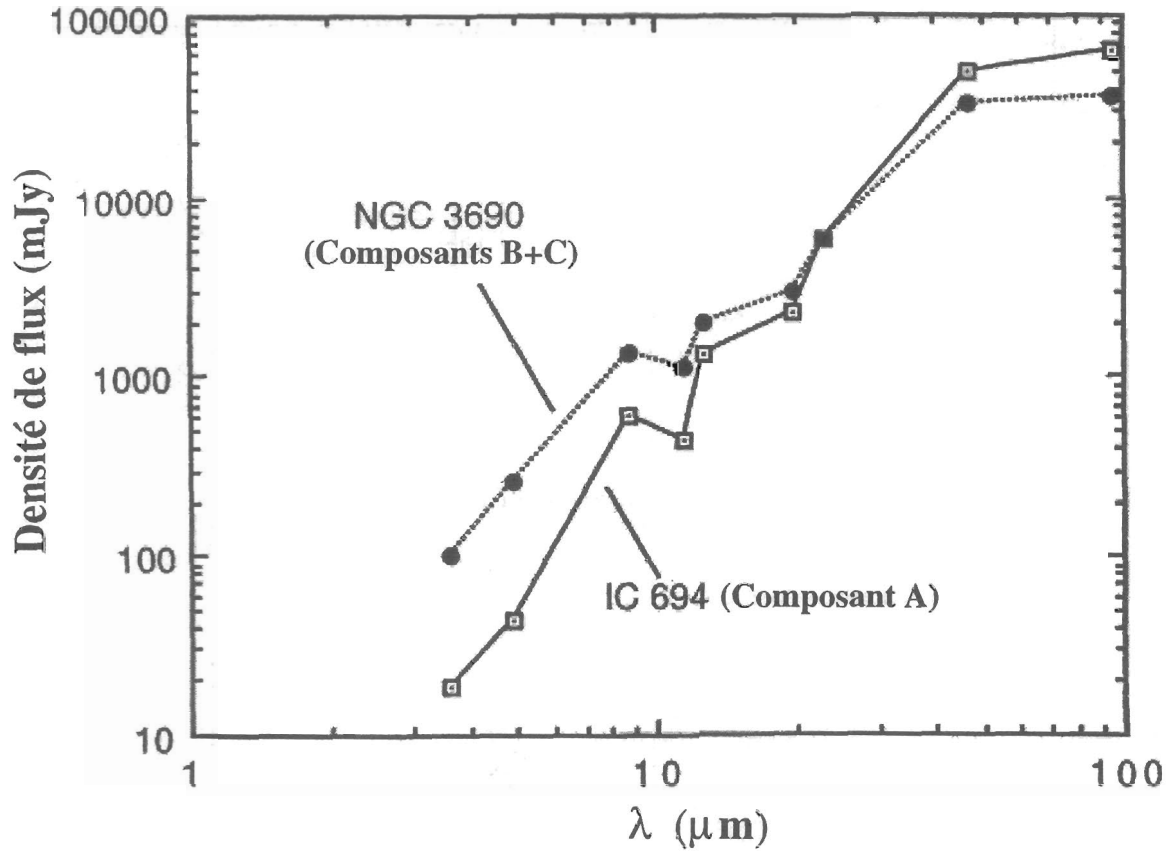


FIG. 5.16 – Distributions spectrales d'énergie entre 3 et 100 μm pour IC 694(A) et NGC 3690(B+C) obtenues par Joy et al. (1989).

3. La présence d'un continuum très chaud à 3.3 μm a aussi été détectée dans la source B1 (Satyapal et al., 1999) qui domine l'émission. Par contre, l'UIB à 3.3 μm devient extrêmement faible par rapport aux autres sources A et C. Les UIBs étant reliées aux PDRs associées aux régions de formation d'étoiles, l'activité starburst est plus faible dans B1. Dans la table 5.2, le rapport de la raie sur son continuum (=Largeur équivalente) devient très faible en présence du continuum dans la source B1 ce qui suggère fortement la présence d'un AGN.

Arp 299	$S_{3.159\mu\text{m}}$ [W m ⁻² μm^{-1} ($\times 10^{-15}$)]	$F_{3.326\mu\text{m}}$ [W m ⁻² ($\times 10^{-16}$)]	$F_{3.326\mu\text{m}}/S_{3.159\mu\text{m}}$ μm
A	7.05	8.53	0.121
B	18.7	2.69	0.014
C	4.37	6.33	0.145

TAB. 5.2 – Photométrie du continuum et de l'UIB à 3.3 μm d'après Satyapal et al. (1999). On a ajouté la largeur équivalente de l'UIB pour chaque source.

4. Les faibles largeurs équivalentes des raies [NeII] et [NeIII] détectées dans B1 au-dessus du continuum à 14-15 μm suggèrent la présence d'un fort continuum. En effet,

bien que le rapport $[\text{NeIII}]/[\text{NeII}]$ puisse varier dans les galaxies starbursts, ces raies sont assez bien détectées au-dessus du continuum. Par exemple, Arp 220 présente une forte raie $[\text{NeII}]$ observée avec SWS (Genzel et al., 1998a). Ce continuum à $14\text{--}15\,\mu\text{m}$ dû à l'AGN étant moins affecté par l'absorption (voir Lutz et al. (1996) pour la loi d'extinction) devrait être plus facilement détecté.

L'ensemble de ces points semblent indiquer la présence d'un AGN encore plus obscurci que dans Cen A, ce qui impliquerait que B1 soit le noyau. D'un autre côté, le problème de B2 reste entier. En effet, dans ce cas à 600 pc du noyau B1, on aurait une concentration importante d'étoiles semblable à celles présentes dans le bulbe d'une galaxie. De plus, le fait de considérer B2 comme le noyau impliquerait que B1 soit une région compacte starburst extra-nucléaire de $2 \times 10^{11} L_{\odot}$ (si on fait comme hypothèse que la source C et C' sont négligeables). Cette région serait 4 fois plus lumineuse que les "Antennes" dans son ensemble ($L_{IR} = 5 \times 10^{10} L_{\odot}$). Elle serait aussi ~ 70 fois plus lumineuse à $15\,\mu\text{m}$ que la région starburst extra-nucléaire des Antennes. En comparaison, les régions C et C' sont respectivement 13 et 10 fois plus lumineuses que cette région compacte starburst observée dans NGC 4038/39.

D'autres observations seront nécessaires pour lever le doute sur la localisation du noyau et sa nature. Néanmoins, si la source B1 contient bien un AGN, alors aucune étude jusqu'à présent n'a pu le révéler clairement ce qui impliquerait qu'un grand nombre d'AGNs puissent être encore non détectés au cœur des galaxies.

Dans la partie suivante, je vais étendre l'étude déjà réalisée sur des objets prototypes à l'ensemble de l'échantillon de galaxies dont nous disposons. Cela va nous permettre de définir des outils de diagnostic qui permettront de classer les spectres et de déterminer, pour une source dont on possède le spectre infrarouge, la nature de l'émission observée.

Astron. Astrophys. 341, 69–73 (1999)

 ASTRONOMY
AND
ASTROPHYSICS

Dust in the wheel: The Cartwheel galaxy in the Mid-IR*

V. Charmandaris^{1,2}, O. Laurent², I.F. Mirabel², P. Gallais², M. Sauvage², L. Vigroux², C. Cesarsky², and P.N. Appleton³¹ Observatoire de Paris, DEMIRM, 61 Av. de l'Observatoire, F-75014 Paris, France² Service d'Astrophysique, CEA-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France³ Department of Physics and Astronomy, Iowa State University, Ames, IA 50011, USA

Received 9 July 1998 / Accepted 13 October 1998

Abstract. We present mid-infrared images at $6.7\ \mu\text{m}$ and $15\ \mu\text{m}$ of “The Cartwheel” (AM 0035-33), the prototypical collisional ring galaxy. The observations, taken with ISOCAM, reveal the distribution of hot dust in the galaxy and its two companions in the north-east. The intensity of the Mid-IR emission from the outer star forming ring of the Cartwheel shows considerable azimuthal variation and peaks at the most active H α region of the ring. The $15\ \mu\text{m}$ to $6.7\ \mu\text{m}$ flux ratio of 5.2 is the highest among all the galaxies of our sample. A surprising result of our observations is the discovery of significant emission from the inner regions of the galaxy, including the inner ring, spokes and nucleus, where previously only low level H α emission had been reported. At $6.7\ \mu\text{m}$, this emission is stronger than the one from the outer star forming ring, and at $15\ \mu\text{m}$, it represents 40% of the emission from the outer ring. The H α to Mid-IR flux ratios from the inner regions are consistent with the heating of grains from weak star formation activity.

Key words: infrared: ISM: continuum – galaxies: starburst – galaxies: interactions – galaxies: individual: The Cartwheel – stars: formation

1. Introduction

Collisional ring galaxies, of which the Cartwheel is the “prototypical” candidate, are believed to form when an “intruder” galaxy passes through the center of a rotating disk of a larger “target” galaxy (Lynds & Toomre 1976; Theys & Spiegel 1976; Appleton & Struck-Marcell 1996 and references therein). The perturbation triggers a radially expanding ring-like density wave on the disk, causing massive star formation in the ring (see Appleton & Marston 1997). The symmetry and well defined dynamical history of ring galaxies has made them ideal candidates for studies of the phase transition of the interstellar medium due to collisionally induced star formation.

Send offprint requests to: V. Charmandaris
(v.charmandaris@obspm.fr)

* Based on observations with ISO, an ESA project with instruments funded by ESA Member States (especially the PI countries: France, Germany, the Netherlands and the United Kingdom) with the participation of ISAS and NASA.

The Cartwheel galaxy was discovered by Zwicky (1941) at a distance of 121 Mpc ($H_0=75\ \text{km s}^{-1}\ \text{Mpc}^{-1}$). It has a bright outer ring and an inner ring which is connected to the outer one with a series of spokes (see Higdon 1996 Fig. 1). Three small companion galaxies located north and north-east of the ring complete the group. It is still unclear which of the companions is the culprit for the creation of the Cartwheel ring (Davies & Morton 1982; Struck-Marcel & Higdon 1993), but it is likely that each of them contains sufficient mass to trigger the generation of the star forming ring (see discussion by Appleton & Struck-Marcell 1996). On-going efforts to simulate the dynamics of the system have been focused on the nearby companion G2 (Bosma priv. comm.) and on the most distant one, G3, (Struck 1997; Horellou priv. comm.) which seems to be connected to the Cartwheel with a plume of H I gas (Higdon 1996).

Due to its unique morphology, the Cartwheel has been the subject of early optical studies (Theys & Spiegel 1976; Fosbury & Hawarden 1977) as well as dynamical modeling (Struck-Marcel & Higdon 1993; Hernquist & Weil 1993). The outer ring of the Cartwheel ($\sim 70''$ in diameter) is expanding, has blue colours and is populated by massive star-forming regions (Higdon 1995, Amram et al. 1998). Most of the star formation though, appears to occur in a localized area of a few H II complexes in the southern sector of the ring. The H α emission, as well as the 20cm and 6cm radio continuum emission vary as a function of the azimuth along the ring and peak in the same region of the southern sector (Higdon 1996). Optical and near-IR imaging show strong radial colour gradients in the disk behind the outer ring, which may trace the evolution of the stellar population in the wake of the density wave (Marcum et al. 1992). Broad band images obtained with the HST (Borne et al. 1997; Appleton 1998) reveal in unprecedented detail the distribution of massive young clusters around the outer ring, as well as the diffuse and knotty structure of the so called “spokes”.

The inner ring ($\sim 18''$ in diameter) and nucleus of the Cartwheel seem gas-poor, have very little H I (Higdon 1996), and no CO emission has been detected so far (Horellou et al. 1995). The failure to detect molecules from the galaxy may be a matter of sensitivity, or low metallicity since recent H α observations (Amram et al. 1998) indicate that there is some low-level star formation in the central regions. Furthermore, HST observations clearly show the presence of well defined dust lanes,

Table 1. Observational parameters

Name:	The Cartwheel	
Coordinates:	a(J2000)	00 ^h 37 ^m 41.62 ^s
	δ (J2000)	-33° 43' 00.4"
Observations:	Instrument	ISOCAM
	Date	November 23, 1996
	Field of view	4.2 × 4.2 arcmin
	Pixel size	6"
Filters:	6.75 μ m (LW2)	range: [5–8.5] μ m
	15 μ m (LW3)	range: [12–18] μ m
Exposure times:	Number of frames	141 per filter
	Frame exposure time	2.1 s
	Total LW2 exposure	5 min
	Total LW3 exposure	5 min

as well as some interesting compact blue comet-like regions on and near the inner ring (Struck et al. 1996). The heads of the cometary structures were suggested to be regions of star formation triggered by the passage of dense clouds moving supersonically through the inner-ring gas. Such clouds may result from infall from the H I plume, or cloud-cloud collisions in the disk.

Although the galaxy as a whole was detected by IRAS at longer wavelengths (Appleton & Struck-Marcell 1987), our ISOCAM Mid-IR observations represent the first detection and mapping of the distribution of the hot dust throughout the galaxy and its nearby companions.

2. Observations and data reduction

The Cartwheel group was observed with ISOCAM (Cesarsky et al. 1996) on November 23 1996 (ISO revolution 372). It was part of the ISO (Kessler et al. 1996) guaranteed time program CAMACTIV (PI. I.F. Mirabel) which prime goal was the Mid-IR imaging of more than 20 nearby active/interacting galaxies. Two broad band filters centered at 6.75 μ m (LW2), and 15 μ m (LW3), with a lens resulting in a 6" pixel field of view, were used to create a 2×2 raster map. The Mid-IR maps cover the Cartwheel galaxy and the two nearby companions G1 and G2. More details on the observational parameters are presented in Table 1.

The standard data reduction procedures described in the ISOCAM¹ manual were followed (Delaney 1997). Dark subtraction was performed using a model of the secular evolution of ISOCAM's dark current (Biviano et al. 1997). Cosmic rays were removed using a multi-resolution median filtering method (Starck et al. 1996) while the memory effects of the detector were corrected using the so-called IAS transient correction algorithm which is based on an inversion method (Abergel et al. 1996). The final raster was constructed after using the instru-

mental flat fields and correcting for the lens field distortion. These methods and their consequences are discussed in detail in Starck et al. (1998).

The ISOCAM LW2 filter mainly samples Mid-IR flux originating from the Unidentified Infrared Bands (UIBs), centered at 6.2, and 7.7 μ m. This feature emission is attributed to stretching modes of 2-dimensional molecules (often called polycyclic aromatic hydrocarbons, or PAHs) having C–C and C–H bonds. It may also contain some contribution from the long wavelength blackbody tail of the stellar photospheric emission. The LW3 filter though, is almost two times wider than the LW2 and it is principally sensitive to the presence of the thermal continuum emission of very small grains. Regions of massive young stars can heat very efficiently the surrounding dust grains and create a strong thermal Mid-IR continuum (i.e. Vigroux et al. 1996). This continuum appears at 12 μ m, its slope steepens as the intensity of the ionizing field increases, and it dominates the Mid-IR emission up to 18 μ m (the long wavelength detection limit of ISOCAM). Several forbidden lines and few UIBs may also appear in the wavelength range covered by LW3, but their contribution to the total flux is usually negligible when the thermal continuum is present.

3. The morphology of the Mid-IR emission

As one can observe from Fig. 1, despite of not being detected in the IRAS 12 μ m and 25 μ m bands (upper limits of ~ 0.1 Jy in both bands), there is Mid-IR emission from the Cartwheel group (see Table 2) and it displays an interesting spatial distribution. In the following subsections, we discuss the morphology and nature of the Mid-IR emission from the two companions, the outer star forming ring of the Cartwheel, as well as from the central regions of the ring galaxy.

3.1. The companions

The morphological types of the two nearby companions of the Cartwheel are distinctly different. The eastern companion (G2) is an early type S0 galaxy. No H I is directly associated with this galaxy (Higdon 1996) and no star formation activity has been detected (Amram et al. 1998). On the contrary, the western companion (G1), a late type galaxy with somewhat irregular spiral arms, has $2.7 \times 10^9 M_{\odot}$ of H I and emits strongly in H α , which indicates the presence of a young stellar population (see Fig. 1 of Amram et al. 1998). The LW2 fluxes of the two galaxies, presented in Table 2, are weak but very similar. This is not true though for the LW3 emission where only the western companion (G1), is detected.

This contrast on the LW2 over LW3 emission from the two companion galaxies is in agreement with our current understanding of the typical Mid-IR signature in galaxies (Vigroux 1997). In early type galaxies the Mid-IR emission is dominated by the old stellar population. The LW2 flux is typically 6 times stronger than the LW3 emission which is consistent with temperatures of ~ 5000 K (Madden 1997). Since the LW2 emission of G2 is just ~ 4 times stronger than the rms noise of the LW3

¹ The ISOCAM data presented in this paper were analyzed using "CIA", a joint development by the ESA Astrophysics Division and the ISOCAM Consortium led by the ISOCAM PI, C. Cesarsky, Direction de Sciences de la Matière, C.E.A., France.

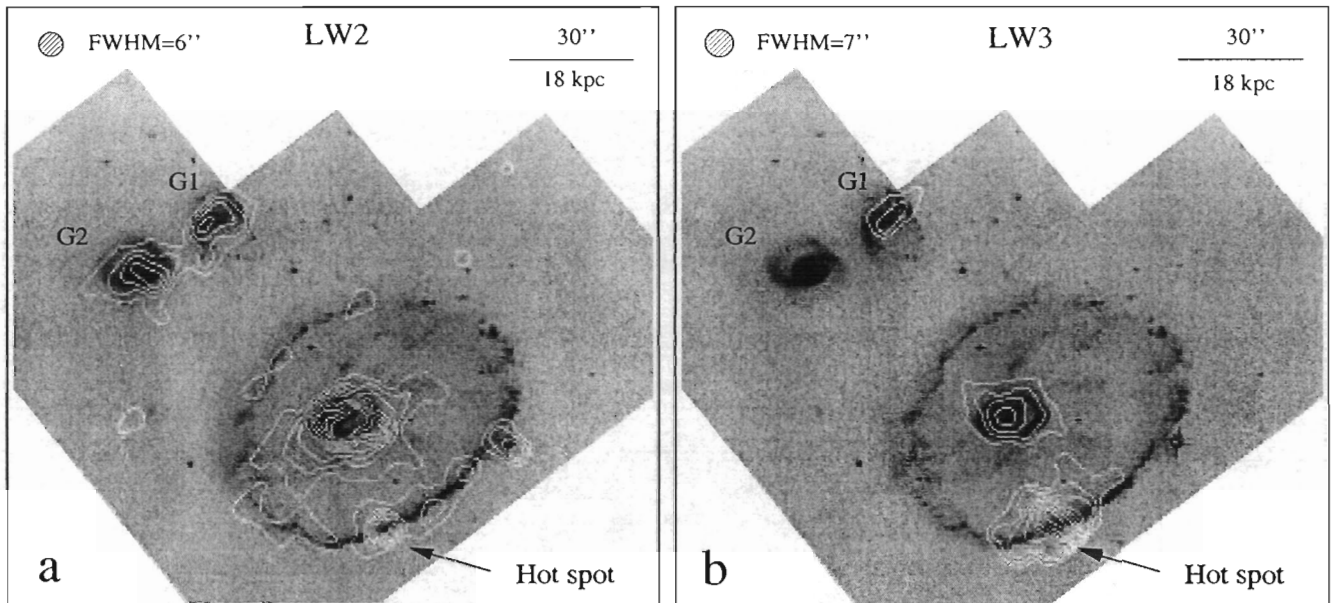


Fig. 1. **a** Contour map of the ISOCAM LW2 emission overlaid on an HST wide I band image. The contour levels are from 0.1 to 0.5 mJy/pixel with a step of 0.05 mJy/pixel. **b** Contour map of the ISOCAM LW3 emission overlaid on the same HST image. The contour levels are 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2 and 1.4 mJy/pixel. North is up and East is left in both images.

emission any expected stellar contribution to the LW3 filter measurement would be below our detection limit. The ratio of LW3 to LW2 flux of G1 is ~ 1.4 , a value found in most normal late type galaxies.

3.2. The Cartwheel outer ring

Our ISOCAM observations reveal that one-third of the circumference of Cartwheel's outer ring is detected in the LW2 band (see Fig. 1a). The detected segment of the ring corresponds to the brightest part of the optical ring as defined by the $H\alpha$ image of Higdon (1995). More than 80% of the total $H\alpha$ flux from the Cartwheel outer ring originates from its south-eastern segment. About 60% of the LW2 flux from the outer ring comes from a hot-spot in the ring, unresolved to our observations, which corresponds to the position of two large HII region complexes (Higdon 1995).

Interestingly, in the LW3 filter, only the hot-spot is detected in the outer ring (Fig. 1b), and the only other emission from the Cartwheel is from the central regions (see Table 2 and discussion below). The LW3/LW2 flux ratio, often used as a diagnostic of the intensity of the radiation field, of the hot-spot is 5.2, a value which is among the highest detected in all interacting galaxies of the CAMACTIV sample. For comparison, the highest LW3/LW2 flux ratio detected in the interacting galaxy NGC 4038/39 is only 2.6 and it is found in the region where the two disks overlap (Vigroux et al. 1996; Mirabel et al. 1998).

The lack of detection in the LW3 filter from regions of the ring other than the hot-spot is intriguing. What is clear is that if the rest of the ring had the same ratio of LW3/LW2 (i.e. 5.2) as the hot-spot, then it would have been easily detected in the

LW3 band. Therefore, using the rms noise of the LW3 image, as well as the total LW2 flux of the ring (excluding the hot-spot – see Table 2), we set a 2σ upper limit on the LW3 to LW2 ratio of 1.45 in the optically bright regions away from the hot-spot. What could be responsible for the difference in flux ratio for the hot-spot, as compared with the other ring regions?

A clue as to why the hot-spot is different comes from a comparison with radio and optical observations. The hot-spot coincides with the peak of the 20cm and 6cm radio continuum emission from the ring, and, unlike the rest of the outer ring, shows a sudden drop in $H I$ surface density at that point (Higdon 1996). Assuming that $H I$ absorption is not responsible for the drop in $H I$ surface density, then this suggests that most of the cool gas in the hot-spot region is either ionized and/or has already been converted into stars. The very powerful UV radiation field in the hot-spot implied by its radio and $H\alpha$ emission – the $H\alpha$ surface density is at least a factor of 3 times higher there compared with the other regions of the ring (Higdon 1995) – would be expected to illuminate a *larger volume* of interstellar grains, thereby boosting the thermal continuum at longer wavelengths sampled by the LW3 filter relative to the shorter wavelength PAH-dominated LW2 emission. For an idealized spherical HII region of radius R , its volume is proportional to R^3 while the volume of the associated photo-dissociation-region (PDR) which has a shell shape would vary as R^2 . Hence, the filling factor of the HII regions in a given giant molecular cloud of the ISM would increase with a higher rate than the corresponding the PDRs. Moreover, in a strong UV environment, the dissociation of PAH molecules would further diminish their contribution to the LW2 flux (i.e. Vigroux 1996). These factors can provide a simple explanation for the larger-than-normal ratio

Table 2. Mid-infrared photometry of the Cartwheel group

Region	Area arcsec ²	LW2 mJy	LW3 mJy	$\frac{LW3}{LW2}$
Nucleus	432	3.6 ± 0.14	3.8 ± 0.38	1.1
Hot Spot	324	1.4 ± 0.12	7.5 ± 0.33	5.2
Ring (total)	540	2.3 ± 0.16	8.9 ± 0.43	(3.8)
Cartwheel	972	5.9 ± 0.21	12.7 ± 0.57	(2.2)
G1	324	1.3 ± 0.12	1.9 ± 0.33	1.4
G2	324	1.6 ± 0.12	< 0.3	< 0.2
RMS/pixel		0.04	0.11	

of LW3/LW2 in the hot-spot region based purely on a difference in the strength of the local radiation field.

An explanation for the variable ratio of LW3/LW2 fluxes in the ring may be a purely geometrical one. It is likely that the very strong star formation in the south-western segment of the ring is sufficient to create local galactic fountains which would lift dust grains to large vertical disk scale-heights, the typical size of which can be calculated (i.e. Tenorio-Tagle & Bodenheimer (1988). Based on the 20cm radio continuum flux the type II supernova (SN) rate on the outer ring is $\mu_{SN} = 0.1 \text{ yr}^{-1}$ (Higdon 1996). Since the density wave is propagating with $\sim 40 \text{ km s}^{-1}$ across the disk, for an instantaneous burst model the total number of supernovae created on the outer ring of the Cartwheel ($\sim 5 \text{ kpc}$ in width) is $\sim 10^7$ over a period of $1.2 \times 10^8 \text{ yrs}$. Assuming a typical energy output per supernova of 10^{51} ergs , an ISM density of 1 cm^{-3} , and that the SN are uniformly distributed on the ring, we estimate a vertical scale up to $\sim 4 \text{ kpc}$ (see Tenorio-Tagle & Bodenheimer 1988, Sect. 3.1.1). The previous calculations, though rough, since they do not consider the finite thickness of the galaxy disk, clearly suggest that the gas/dust of the ring will be distributed in a torus-like shape.

This “puffing” of the ring in combination with the stellar winds of the forming stars would result in making the star forming regions density bounded and diluting of the UV field in the local ISM. As distance from the H II regions increases vertically, the heating flux would be lowered, and the small grain emission (and as a result the LW3 flux) would decrease exponentially. On the other hand, since the LW2 band is dominated by thermally-spiked PAH features, its emission strength would decrease almost linearly to the heating intensity (Sauvage et al. 1996), making LW2 stronger relatively to LW3. This could also explain why even though more than 95% of the detected star formation is clearly taking place in the outer ring of the Cartwheel (Amram et al. 1998) the Mid-IR fluxes of the outer ring and nuclear regions are comparable.

3.3. The inner ring and nucleus

Until recently, it was believed that the outer ring of the Cartwheel was the only one that showed signs of star formation activity (Fosbury & Hawarden 1977; Higdon 1995). However, our new observations show conclusively that the inner ring is strongly

detected with ISOCAM. The low spatial resolution of our images does not allow us to resolve the inner ring and dust lanes observed by HST around the nucleus of the Cartwheel (Struck et al. 1996). Although centrally concentrated, the emission from the central regions is resolved and a faint filament of LW2 emission extending to the west of the nucleus follows one of the “spokes” seen in the optical images. However, it was initially a surprise for us to detect such a strong signal from the center of the Cartwheel, which had previously been believed to be almost devoid of nuclear activity (Fosbury & Hawarden 1977, Higdon 1995). The center of the Cartwheel exceeds the outer star-forming ring by a factor of 1.6 in the LW2 filter while it has 0.4 times the flux of the outer ring in the LW3 filter. The nuclear region has Mid-IR colours similar to those of late type galaxies ($LW3/LW2 = 1.1$, see Table 2), although optically, it has very red colours suggestive of an older stellar population (Struck et al. 1996).

We have mentioned that Amram et al. (1998) have recently detected low-level H α emission from the Cartwheel center, a result confirming other independent observations (Higdon priv. comm.). If one assumes that the H α emission originates in normal H II regions, could the observed LW3 emission be explained in terms of warm dust heated by young stars? We can estimate the amount of LW3 flux produced by star formation in the nucleus if we use the LW3 to H α correlation found in M51 (Sauvage et al. 1996). Supposing that the H α flux detected by Amram et al. (1998, see Fig. 1), is distributed over the inner ring annulus (area $\sim 170 \text{ arcsec}^2$) of the Cartwheel and that typically $LW3/H\alpha \sim 30$, we find that the predicted LW3 is about 3.5 mJy, which is of the same order as the observed LW3 emission from the Cartwheel center. Hence, it appears that despite its rather low-intensity, star formation activity from the Cartwheel center is sufficient to heat the dust and produce the observed Mid-IR emission.

Another possible source of dust heating in the nuclear region could be attributed to the infall of gas clouds. This was proposed by Struck et al. (1996) based on the morphology of kiloparsec size, cometary-like structures with blue luminosities in the range $1.1\text{--}1.7 \times 10^{40} \text{ ergs s}^{-1}$, detected in the edge of the inner ring. An order of magnitude calculation by the authors suggests that the dissipation of the kinetic energy of the accreting clouds via shocks, would be $\sim 10^{40} \text{ ergs s}^{-1}$, sufficient to generate a fraction of the observed blue luminosities.

4. Conclusions

We have obtained Mid-IR ISOCAM broad-band images of the Cartwheel group and comparing our data with our sample of normal and active galaxies we were able to draw the following conclusions:

1) A large segment of the outer ring is detected in the LW2 filter which is mainly dominated by thermally-spiked PAH emission bands, while at longer wavelengths (LW3 filter), where the emission is primarily due to dust grains in nearly thermal equilibrium, the main source of emission originates from a single hot-spot in the ring associated with a particularly bright complex of H II

regions. The hot-spot has an exceptional Mid-IR broad-band diagnostic ratio LW3/LW2 of 5.2 which is among the highest of any region in the CAMACTIV sample and is different from other regions of the ring.

2) A large fraction of the Mid-IR emission is associated with the inner ring and nucleus of the Cartwheel, in stark contrast to that expected from optical emission-line studies (where most of the line emission originates from the outer ring). Recently faint H α emission has been detected from the inner ring and it is possible that this may be due to a low-level star formation which heats the grains. However, in order to explain why the nuclear emission is so powerful compared with the outer ring at ISOCAM wavelengths, it seems that the dust of the outer ring must be spatially distributed very differently. One possibility is that the grains in the outer ring experience a significantly diluted UV radiation field because they are lifted out of the disk by stronger stellar winds. Alternatively, the nuclear regions may be heated by a very different process than the outer, for example shock waves from infalling clouds (Struck et al 1996).

3) The Mid-IR emission from the two companions is typical for their Hubble type.

Even though our observations shed some more light to the properties of the hot dust in the Cartwheel galaxy, the amount and spatial distribution of the cold dust remain uncertain. The 100 μ m IRAS flux of the galaxy is 1.6 Jy but previous efforts to detect CO emission (Horellou 1995) were unsuccessful, setting an upper limit to the H $_2$ mass of $1.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$. Could this be explained by the low metallicity of the system, by its intrinsically low molecular gas content or simply by the large distance of the Cartwheel? Where is the peak of the spectral energy distribution in this galaxy? Deep sub-mm and mm wave observations which are scheduled in the near future should enable us to address these questions.

Acknowledgements. The authors are grateful to F. Combes (Obs. de Paris), C. Struck (Iowa State Univ.), C. Horellou (Onsala Space Obs.), and J. Higdon (Kapteyn Institute) for comments and stimulating discussions, as well as the referee for useful suggestions which improved this paper. VC would like to acknowledge the financial support from the TMR fellowship grant ERBFMBICT960967 and the help of all members of the ISOCAM team at CEA-Saclay.

References

- Abergel A., Bernard J.P., Boulanger F., et al., 1996, A&A 315, L329
 Amram P., Mendes de Oliveira C., Boulesteix J., Balkowski C., 1998, A&A 330, 881
 Appleton P.N., 1998, In: Barnes J., Sanders D. (eds.) Galaxy Interactions at Low and High Redshift. IAU 186, in press
 Appleton P.N., Marston A.P., 1997, AJ 113, 201
 Appleton P.N., Struck-Marcell C., 1987, ApJ 312, 103
 Appleton P.N., Struck-Marcell C., 1996, Fund. of Cos. Phys. 16, 111
 Biviano A., Sauvage M., Roman P., E.S.A./C.E.A Technical Report, December 1997
 Borne K.D., Appleton P.N., Lucas R.A., Struck C., Schultz A.B., 1997, Rev. Mex. Astron. Astrofis. 6, 141
 Cesarsky C.J., Abergel A., Agnès P., et al., 1996, A&A 315, L32
 Davies R., Morton D., 1982, MNRAS 201, 69
 Delaney M., 1997, ISOCAM Interactive Analysis User's Manual. SAI-96-5226/Dc.
 Fosbury R., Hawarden T., 1977, MNRAS 178, 473
 Hernquist L., Weil M., 1993, MNRAS 261, 804
 Higdon J., 1995, ApJ 455, 524
 Higdon J., 1996, ApJ 467, 241
 Horellou C., Casoli F., Combes F., Dupraz C., 1995, A&A 298, 743
 Kessler M.F., Steinz J.A., Anderegg, M.E., et al., 1996, A&A 315, L27
 Lynds R., Toomre A., 1976, ApJ 209, 382
 Madden S., 1997, In: Mamon G.A., Trinh Xuan Thuan, Tran Thanh J. (eds.) XVIIth Moriond Astrophysics Meeting: Extragalactic Astronomy in the Infrared. p. 229,
 Marcum P., Appleton P.N., Higdon J., 1992, ApJ 399, 57
 Mirabel I.F., Vigroux L., Charmandaris V., et al., 1998, A&A 333, L1
 Sauvage M., Blommaert J., Boulanger F., et al., 1996, A&A 315, L89
 Starck J.-L., Claret A., Siebenmorgen R., C.E.A. Technical Report, March 1996
 Starck J.-L., Abergel A., Aussel H., et al., 1998, A&AS 133, in press
 Struck C., 1997, ApJS 113, 269
 Struck C., Appleton P.N., Borne K.D., Lucas R.A., 1996, AJ 112, 1868
 Struck-Marcell C., Higdon J., 1993, ApJ 411, 108
 Tenorio-Tagle G., Bodenheimer P., 1988, ARA&A 26, 145
 Theys J., Spiegel E., 1976, ApJ 212, 616
 Vigroux L., 1997, In: Mamon G.A., Trinh Xuan Thuan, Tran Thanh J. (eds.) XVIIth Moriond Astrophysics Meeting: Extragalactic Astronomy in the Infrared. p. 63
 Vigroux L., Mirabel I.F., Altieri B., et al., 1996, A&A 315, L93
 Zwicky F., 1941, In: Contribution to Applied Mechanics and Related Subjects. Theodore von Karman Anniversary volume, California Institute of Technology, Pasadena, California, p. 137

Troisième partie

Etude générale de l'émission infrarouge des galaxies

Chapitre 6

Classification des galaxies avec ISOCAM

Sommaire

6.1	Introduction	99
6.2	Les couleurs ISOCAM: LW2/LW3	100
6.3	Les spectres prototypes dans l'infrarouge moyen	102
6.4	Diagrammes de diagnostics avec ISOCAM.	104
6.4.1	Diagnostics séparant les PDRs des AGNs/régions HII	105
6.4.2	Diagnostics séparant les régions HII des AGNs/PDRs	111
6.4.3	Diagrammes de diagnostics à deux dimensions	113
6.4.4	Les limitations de la classification Starburst/AGN	121
6.5	Article: "Mid-infrared diagnostics to distinguish AGNs from starbursts"	123
6.6	Conférence: "Spatial resolution bias in the mid-infrared Starburst/AGN classification"	139

6.1 Introduction

Nous avons étudié jusqu'à présent les propriétés spectrales des galaxies proches ce qui nous a permis de séparer spatialement ces différents constituants (AGN, starbursts). Cependant, dans la plupart des cas, la résolution spatiale d'ISOCAM n'est pas suffisante pour résoudre la galaxie ou du moins le noyau du disque. L'émission observée est alors le résultat de l'intégration de ces différentes régions montrant des propriétés spectrales très différentes. Ce chapitre va consister en l'étude de l'ensemble des spectres de galaxies à notre disposition dans le but de décomposer les différentes contributions constituant le spectre intégré. Cette méthode doit nous permettre de séparer quantitativement les spectres en différentes classes dominées par l'AGN, la formation d'étoiles ou la contribution stellaire. Finalement, on montrera que l'on peut utiliser ces diagnostics pour révéler la présence ou non d'un AGN au cœur d'une galaxie.

6.2 Les couleurs ISOCAM: LW2/LW3

Les filtres LW2 et LW3 centrés respectivement à $7\mu\text{m}$ et $15\mu\text{m}$ sont les plus utilisés avec ISOCAM. En effet, leur grande largeur de bande permet d'observer des objets faibles. De plus, ils sont sensibles à deux régions du spectre très distinctes avec les UIBs pour LW2 et le continuum pour LW3.

La plupart des objets proches observés avec ISOCAM l'ont également été avec IRAS. Sur la figure 6.1, on a représenté les diagrammes couleur-couleur entre IRAS et ISO.

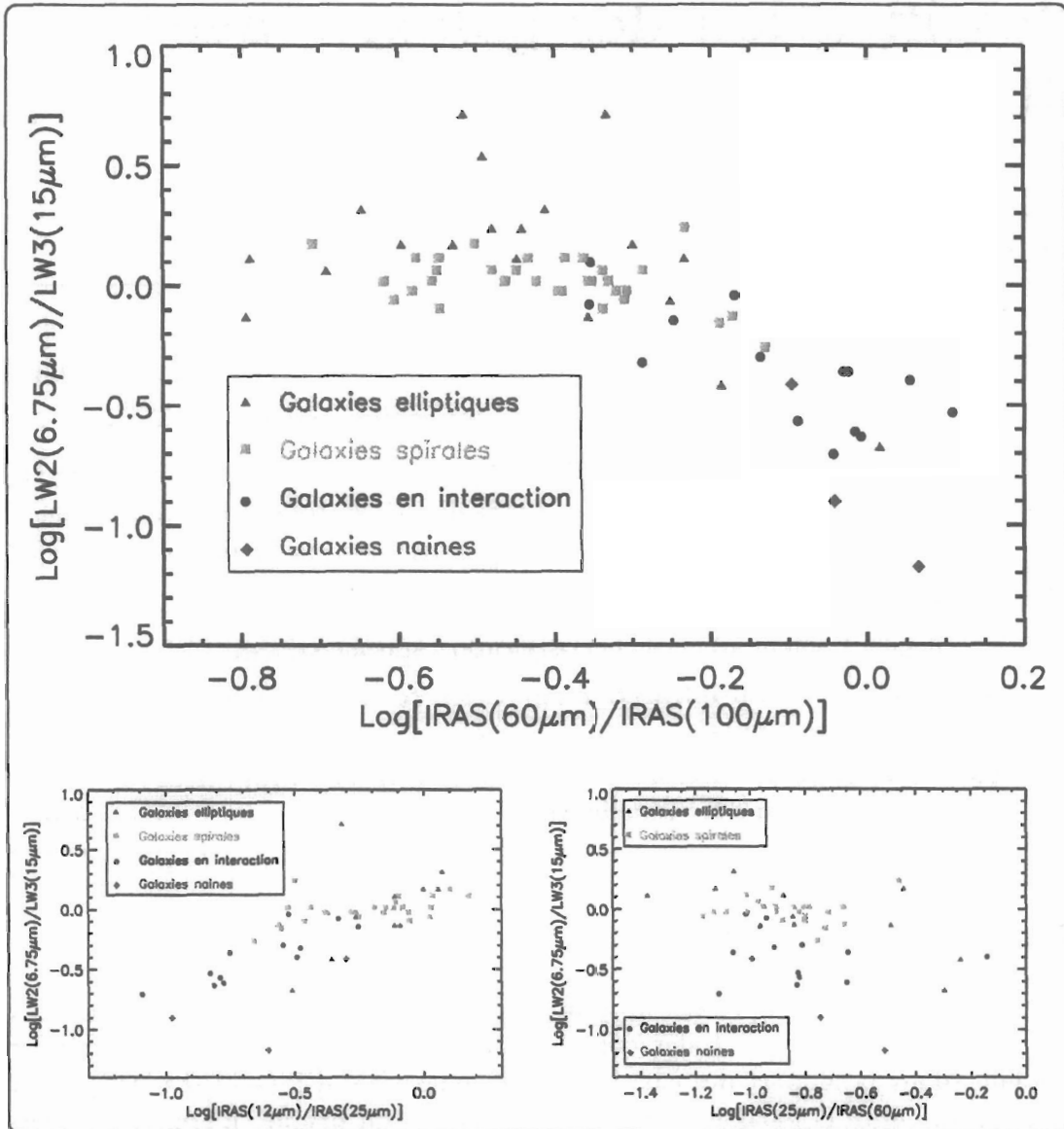


FIG. 6.1 – Diagrammes couleur-couleur IRAS-ISOCAM. Ces diagrammes regroupent quatre échantillons distincts de galaxies (voir Vigroux et al., 1999). Les triangles rouges représentent les galaxies elliptiques obtenues par Madden et al. (1999a). Les carrés verts sont pour les galaxies spirales barrées et non barrées de Roussel et al. (1999). Les galaxies naines (losanges bleus) ont été étudiées par Madden et al. (1999b). Les galaxies en interaction (cercles noirs) proviennent de notre échantillon.

Ces diagrammes regroupent les observations du programme extra-galactique du groupe ISOCAM de Saclay (Vigroux et al., 1999; Laurent et al., 1999; Madden et al., 1999a; Madden et al., 1999b; Roussel et al., 1999).

A noter, que l'on a utilisé le rapport LW2/LW3 par cohérence avec les couleurs IRAS que utilisent toujours le rapport classique des courtes longueurs d'onde sur les grandes longueurs d'onde.

Le diagramme utilisant le rapport $\text{Log}[f_{60\mu\text{m}}/f_{100\mu\text{m}}]$ se divise en deux grandes régions. En-dessous de -0.3 pour le rapport IRAS où se trouvent l'essentielle des galaxies normales, LW2/LW3 reste relativement constant. Ces rapports proches de l'unité pour les galaxies spirales ($\text{LW2/LW3} \sim 1.03 \pm 0.23$) caractérisent des spectres dominés par les UIBs. La composante stellaire dans les galaxies elliptiques donne les rapports LW2/LW3 les plus élevés ($\text{LW2/LW3} \sim 1.8 \pm 1.3$) bien que certaines d'entre elles comme les elliptiques riches en gaz ou contenant un AGN puissent aussi être dominées par de la poussière en émission.

Dans la partie droite du diagramme ($\text{Log}[f_{60\mu\text{m}}/f_{100\mu\text{m}}] > -0.3$) où l'on sélectionne les galaxies les plus "chaudes" en infrarouge lointain, on observe une diminution continue du rapport ISOCAM. Les galaxies en interaction de notre échantillon présentent la plupart une intense activité liée soit au starburst soit à l'AGN. Comme on l'a vu dans les chapitres précédents, ces types de galaxies présentent un fort continuum par rapport aux UIBs ce qui a pour conséquence de diminuer le rapport LW2/LW3. A noter que les galaxies les plus extrêmes dans ce diagramme sont deux galaxies naines où l'activité starburst est telle que les porteurs des UIBs sont partiellement voire complètement détruits par le champ de rayonnement (Madden et al., 1999a). Dans le chapitre concernant les AGNs, on a vu que l'émission observée dans le filtre LW2 provenait non pas des UIBs mais du continuum important entre 5 et $10\mu\text{m}$, néanmoins le rapport LW2/LW3 reste toujours faible et ne permet pas de séparer les AGNs des starbursts.

Les deux diagrammes en bas de la figure 6.1 utilisent les deux autres rapports IRAS à savoir $f_{12\mu\text{m}}/f_{25\mu\text{m}}$ (à gauche) et $f_{25\mu\text{m}}/f_{60\mu\text{m}}$ (à droite). Sur le diagramme de gauche, la répartition inversée des galaxies est cohérente avec la corrélation IRAS entre $f_{12\mu\text{m}}/f_{25\mu\text{m}}$ et $f_{60\mu\text{m}}/f_{100\mu\text{m}}$. A droite, il est intéressant de noter que les galaxies les plus chaudes avec $\text{Log}[f_{25\mu\text{m}}/f_{60\mu\text{m}}] > -0.3$ (une ULIRG dominée par un AGN: Mrk 463 et deux radio galaxies: NGC 1275 et NGC 1052) qui contiennent une composante AGN importante, ne présentent pas les plus bas rapports LW2/LW3. En effet, bien que les UIBs soient faibles dans les AGNs, la forte contribution du continuum dans la bande LW2 ($5-8.5\mu\text{m}$) donne un rapport LW2/LW3 moins faible que dans le cas de certaines régions starbursts comme la galaxie II Zw 40. Les plus bas rapports se rencontrent uniquement dans les galaxies starbursts avec de très faibles UIBs comme les galaxies naines bleues compactes (Madden et al., 1999a).

Par la suite, le rapport LW3/LW2 est préféré puisqu'il apparaît que les galaxies de notre échantillon présentent une émission à $15\mu\text{m}$ supérieure à celle à $7\mu\text{m}$. Ce rapport permet ainsi d'avoir un intervalle de valeurs pour LW3/LW2 compris entre 1 et 15. De plus, l'augmentation de ce rapport est reliée avec l'activité AGN ou starburst dans les galaxies pour $f_{60\mu\text{m}}/f_{100\mu\text{m}} > -0.5$. Les quelques AGNs de notre échantillon montrent un spectre croissant en longueur d'onde caractérisé pas un rapport LW3/LW2 relativement

stable compris entre 2 et 4. Par contre, l'émission provenant des régions de formation d'étoiles montre des variations du rapport LW3/LW2 beaucoup plus importantes entre 1 et 15. Cette variation s'explique en termes de contribution plus ou moins grande du continuum associé aux régions HII. Ainsi dans des galaxies starbursts ne contenant pas de contribution AGN, ce rapport LW3/LW2 permet d'estimer l'efficacité de formation d'étoiles.

Sur la figure 6.2, on présente 8 galaxies de notre échantillon observées dans différentes étapes d'interaction (Charmandaris et al., 1999a). Ces galaxies ne contiennent pas de contribution AGN détectable dans l'infrarouge moyen. On note que ce rapport LW3/LW2 est bien corrélé avec les rapports de flux IRAS. De plus, il permet de suivre les différentes phases d'activité de formation d'étoiles en fonction de la séquence temporelle d'interaction. Ainsi le rapport LW3/LW2 permet de suivre l'évolution globale de l'activité de formation d'étoiles dans ces systèmes de galaxies en interaction.

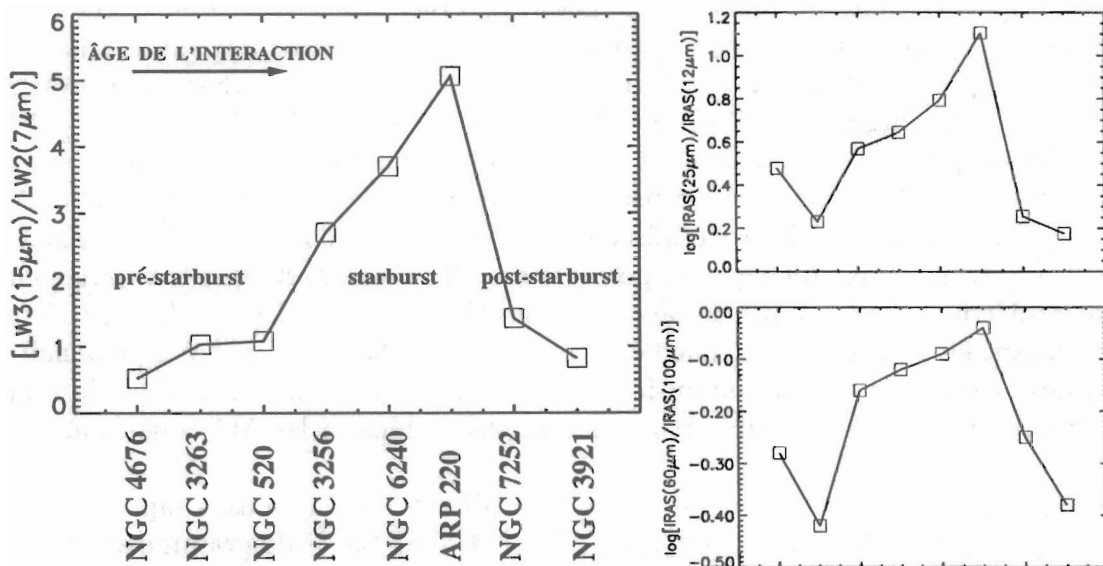


FIG. 6.2 – Variation du rapport LW3/LW2 le long de la séquence d'interaction.

6.3 Les spectres prototypes dans l'infrarouge moyen

A partir de l'étude de l'émission intégrée provenant des galaxies (elliptiques et spirales) caractérisées par la présence de phénomènes énergétiques plus ou moins intenses résultant de la formation d'étoiles et/ou d'un AGN, nous pouvons distinguer quatre types principaux d'émission. Leurs propriétés spectrales dans l'infrarouge moyen étant très différentes, nous proposons dans ce chapitre différents indicateurs permettant d'estimer qualitativement mais aussi quantitativement la fraction de chaque composante dans le spectre intégré d'une galaxie. Comme chaque composante spectrale (émission stellaire, UIBs, continuum des VSGs et de poussières très chaudes à $\sim 500-1000K$) caractérise des processus physiques différents (photosphères, PDRs, régions HII, AGN), nous allons voir que nous pouvons classer chaque galaxie respectivement dans la catégorie des

elliptiques, spirales normales, galaxies starbursts et à noyau actif.

Au chapitre 1, nous avons vu que l'émission des galaxies normales entre 5 et 16 μm est principalement attribuée à deux types de processus. On observe d'une part l'émission Rayleigh-Jeans de la photosphère de la population stellaire évoluée (observée dans les galaxies elliptiques) et d'autre part l'émission provenant de la poussière du milieu interstellaire chauffée par le rayonnement (optique et UV) des étoiles (observée dans les galaxies spirales). Les galaxies actives au sens larges caractérisées par une forte activité starburst ou AGN sont dominées par de la poussière en émission dans l'infrarouge moyen. Nous allons résumer brièvement les quatres types d'émission que nous utiliserons par la suite comme modèle (voir Fig. 6.3).

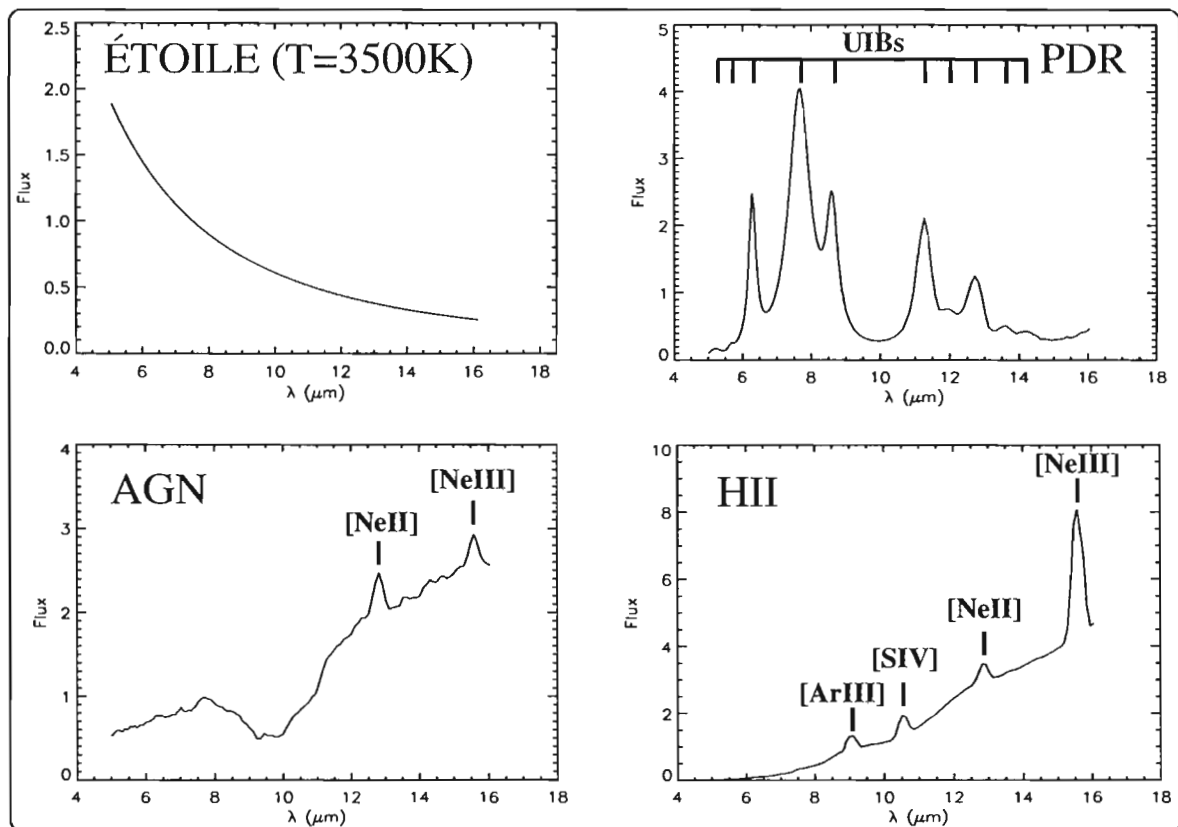


FIG. 6.3 – Prototypes de spectres caractérisant individuellement les 4 principales sources d'émission en infrarouge. En haut, le spectre stellaire d'étoiles évoluées (à gauche) et le spectre d'une PDR dominant l'émission des milieux faiblement actifs (galaxies normales et elliptiques sans starburst ni AGN). En bas, on a représenté les spectres de régions actives en termes d'intensité et de dureté du champ de rayonnement produit dans les régions ionisées proches d'étoiles jeunes (à droite) ou bien dans les AGNs (à gauche). A noter que les flux ont été normalisés à l'énergie intégrée entre 5 et 16 μm .

- La composant stellaire associée aux étoiles évoluées (faibles températures de surface avec $T \sim 3000\text{--}4000\text{ K}$). On a modélisé cette composante par un corps noir

à $T = 3500$ K qui rend compte des observations en filtres larges de la galaxie elliptique NGC 4649 (voir Fig. 2.7 et Madden et al., 1999b).

- Les UIBs produites par des petites molécules composées de liaisons aromatiques proviennent essentiellement des régions de photo-dissociations situées entre la région "pure" HII et le nuage moléculaire. Les régions diffuses présentent également des spectres dominés par les UIBs. Ce type de spectre domine l'émission des galaxies spirales normales.
- Le continuum des VSGs (pouvant être ajusté à un corps noir de température $T \sim 200$ K) provient des régions ionisées par des étoiles jeunes. Les raies ioniques les plus courantes et intenses sont les raies du néon ([NeII] à $12.8 \mu\text{m}$ et [NeIII] à $15.5 \mu\text{m}$) produites dans les régions de rayonnement ionisant. Mais on rencontre aussi d'autres raies ioniques émises par l'argon ([ArII] à $7 \mu\text{m}$, [ArIII] à $9 \mu\text{m}$) et le soufre ([SIV] à $10.4 \mu\text{m}$).
- Le continuum de poussières très chaudes (ne pouvant pas être ajusté à un unique corps noir semblable aux VSGs) nécessite des températures très importantes ($T \sim 500-1000$ K) pour émettre autant dans l'infrarouge entre $2-10 \mu\text{m}$. Ce type de spectre caractérise dans notre échantillon de galaxies uniquement les AGNs, ici représentés par le noyau de Cen A. Seules quelques raies ioniques à forts potentiels d'ionisation révèlent l'AGN comme la raie du [NeV] à $14.3 \mu\text{m}$ et celle du [NeVI] à $7.65 \mu\text{m}$ faiblement détectée dans NGC 1068 avec ISOCAM, mais observée avec ISO-SWS.

Chaque type d'émission peut être ainsi caractérisé par un ensemble de propriétés qui lui est propre. On a développé plusieurs indicateurs basés sur des rapports de filtres permettant de séparer ces différents constituants.

6.4 Diagrammes de diagnostics avec ISOCAM.

L'origine de l'émission en infrarouge moyen provient essentiellement soit de la photosphère d'étoiles évoluées observée essentiellement dans les galaxies elliptiques soit de la poussière rencontrée dans le milieu interstellaire de galaxies riches en gaz. Notre échantillon étant composé de galaxies spirales ou elliptiques riches en poussière, la contribution des étoiles au continuum est négligeable la plupart du temps. C'est pour cette raison que nous limitons pour l'instant notre étude aux cas des galaxies riches en poussière. A partir des trois spectres prototypes, PDR et HII pour les régions starbursts et AGN, nous avons construit un échantillon de spectres composites. Cette bibliothèque spectrale (101×101 spectres) contient l'ensemble des combinaisons possibles de 0 à 100 % pour chaque spectre PDR, HII et AGN. En appliquant à ces spectres des critères de sélection, nous pouvons définir quantitativement les différentes contributions spectrales. Nous illustrons les résultats des diagnostics en appliquant ces mêmes indicateurs sur M 17, NGC 1068, M 82 et NGC 7023.

6.4.1 Diagnostics séparant les PDRs des AGNs/régions HII

Les UIBs sont observées principalement dans les PDRs ainsi que dans les régions diffuses. Les spectres d'AGNs et de régions HII sont essentiellement dominés par un continuum sans UIBs. Il paraît donc naturel d'utiliser l'indicateur UIB/Continuum pour estimer la contribution des PDRs et régions diffuses sur celles fortement ionisées (HII ou AGN). La contribution des UIBs peut être facilement estimée en intégrant l'émission au-dessus du continuum défini avant et après la bande. On se restreint aux plus intenses UIBs à 6.2, 7.7, 8.6 et 11.3 μm qui sont facilement identifiables par rapport au continuum.

Par contre, l'estimation du continuum sous-jacent est plus difficile à cause de la forte contribution des UIBs de 5 à 14 μm . Nous pouvons tout de même définir la partie du spectre sous-jacente aux bandes qui contient le continuum ainsi qu'une partie des UIBs (voir Fig. 6.4). On note clairement que seuls les spectres avec de fortes UIBs vont être caractérisés par un fort rapport UIBs/Continuum. Cette technique va nous permettre de séparer quantitativement les spectres dominés par les UIBs (PDRs, régions diffuses) des spectres dominés par un continuum (régions HII, AGNs).

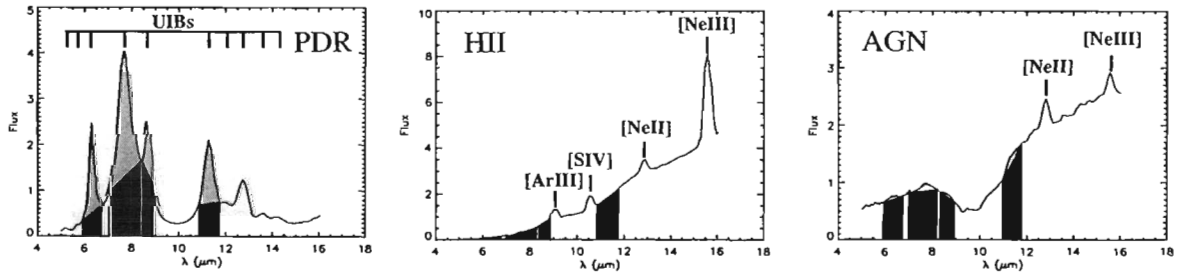


FIG. 6.4 – Méthodes utilisées pour estimer les rapports UIBs/Continuum. Sur chaque spectre prototype, nous pouvons estimer les rapports UIB/Continuum à 6.2, 7.7, 8.6 et 11.3 μm .

Sur la figure 6.5, les quatre indicateurs UIB/Continuum à 6.2, 7.7, 8.6 et 11.3 μm sont appliqués sur les spectres composites ainsi que sur quatre objets proches (2 régions galactiques M 17, NGC 7023 et deux galaxies NGC 1068, M 82). La galaxie active NGC 1068 qui est dominée par l'AGN dans l'infrarouge moyen montre clairement un faible rapport UIB/Continuum. C'est l'objet le plus actif du point de vue de l'intensité relative des UIBs parmi les quatre sources. La région galactique M 17 contient une région HII avec très peu d'UIBs (à l'extrême gauche du diagramme) délimitée par une PDR (2^{ème} pic) au niveau de M 82. On notera qu'à mesure que l'on se déplace vers les grandes longueurs d'onde, la contribution du continuum augmente en faisant diminuer le rapport UIB/Continuum. La galaxie starburst M 82 est dominée par les UIBs à 6.2, 7.7 et 8.6 μm . Dans la région centrale starburst, un plus fort continuum commence à influencer le rapport UIB/Continuum à 11.3 μm . La PDR observée dans NGC 7023 montre bien les plus forts rapports. Ces différents diagnostics permettent de quantifier la contribution des UIBs par rapport au continuum. Les régions fortement ionisées comme les AGNs ou les régions HII présentent bien un déficit d'UIBs (NGC 1068, M 17) très net par rapport aux régions dominées globalement par les PDRs ou régions diffuses (M 82, NGC 7023).

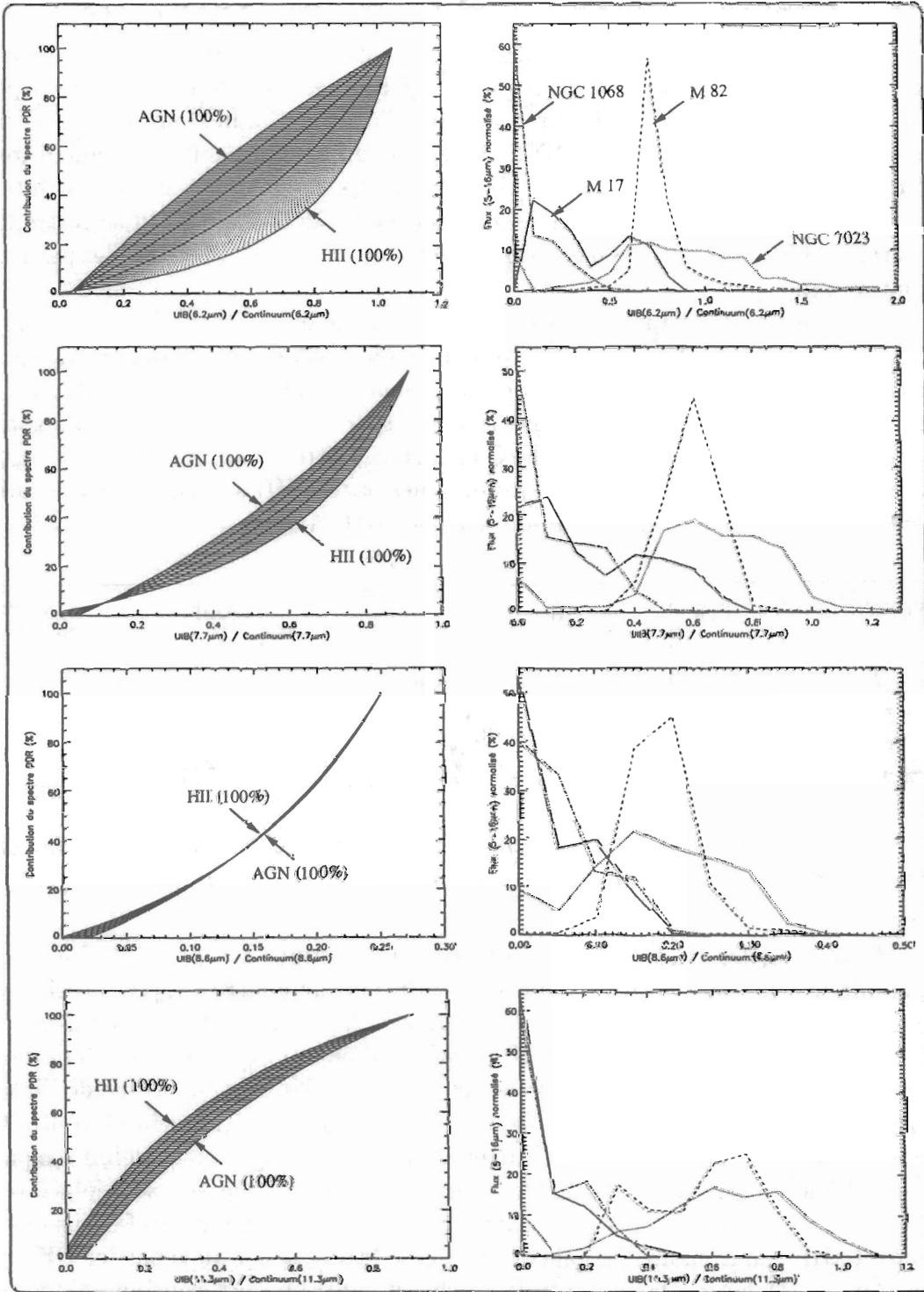


FIG. 6.5 – Applications des indicateurs $UIB/Continuum$. A gauche, on a estimé la fraction de l'énergie intégrée de 5 à 16 μ m contenue dans les spectres composites en fonction des rapports $UIB/Continuum$. Pour un pourcentage de spectre PDR donné, on peut avoir des contributions variables AGN, HII (de 0 à 100% de la fraction restante). A droite, on a appliqué le diagnostic sur NGC 1068, M 82, NGC 7023 et M 17. L'échantillonnage sur l'axe X est de 0.1 pour 6.2, 7.7 et 11.3 μ m et 0.05 pour 8.6 μ m.

Etant donné que seules les sources les plus intenses ont été observées en mode CVF, il est nécessaire également de développer un indicateur UIB/Continuum qui utilise les filtres larges ISOCAM. Au moins un des filtres doit être centré dans l'intervalle $5\text{--}10\ \mu\text{m}$ où les UIBs dominent lorsqu'elles sont présentes. On a à notre disposition les filtres LW2($5\text{--}8.5\ \mu\text{m}$), LW4($5.5\text{--}6.5\ \mu\text{m}$), LW5($6.5\text{--}7\ \mu\text{m}$) et LW6($7\text{--}8.5\ \mu\text{m}$). Différents rapports à partir de ces filtres vont nous permettre de détecter la présence d'un continuum entre $5\text{--}10\ \mu\text{m}$ caractérisant l'AGN mais aussi à un degré moindre les régions HII. Sur la figure 6.6, quatre types d'indicateurs sont appliqués sur l'ensemble des spectres ainsi que sur les quatre objets prototypes. Ces indicateurs sont moins bien adaptés pour estimer exactement l'intensité des UIBs sur leur continuum, néanmoins ils peuvent être utilisés pour distinguer les spectres.

- Pour le rapport LW2/LW4, les régions dominées ($> 50\%$) par les UIBs sont définies entre 1.7 et 2.1. En dessous de 1.7, l'AGN devient prépondérant et au-dessus de 2.1, c'est au tour des régions HII. Les estimations des différents intervalles de contribution à partir des spectres synthétiques se trouvent confirmées par les observations à droite. L'AGN représenté par NGC 1068 se situe bien en dessous de 1.7 plus exactement entre 1.1 et 1.6. La PDR avec NGC 7023 se situe essentiellement entre 1.7 et 2.1 comme pour M 82 qui a aussi un spectre de PDR à $5\text{--}10\ \mu\text{m}$. M 17 se décompose en deux régions dominées par les UIBs (PDR avec LW2/LW4 < 2.1) ou par le continuum (région HII avec LW2/LW4 > 2.1).
- Le rapport LW5/LW4 devient inférieur à 1.2 pour des spectres composés majoritairement d'UIBs comme NGC 7023 puis M 82. Les régions à faibles bandes se trouvent au delà avec l'AGN à 1.2 pour trouver ensuite les régions HII comme M 17 vers 1.4-1.8.
- Le rapport LW6/LW4 donnent des critères de sélection comparables à LW2/LW4. Les spectres PDRs dominant entre 2.3 et 3.3 (voir NGC 7023 et M 82). L'AGN se distingue bien avec un rapport inférieur à 2.3 (voir NGC 1068). Les régions sélectionnées HII se trouvent après 3.3 (voir M 17).
- Pour finir, nous avons utilisé l'indicateur LW3($12\text{--}18\ \mu\text{m}$)/LW2($5\text{--}8.5\ \mu\text{m}$) qui est composé des deux filtres les plus larges et de ce fait, les plus couramment utilisés avec ISOCAM et en particulier pour des observations de sources faibles. Les faibles rapports inférieurs à 2 tracent des régions majoritairement composées de PDRs. Au-delà de 2, on trouve des AGNs ainsi que des starbursts et pour des rapports extrêmes supérieurs à 6 des régions pures HII. Ce rapport LW3/LW2 peut être utilisé comme un indicateur d'activité que ce soient en termes de formation d'étoiles ou de noyaux actifs.

Nous avons vu qu'il était possible de sélectionner les spectres en fonction de l'intensité relative des UIBs en utilisant des critères spectraux. Ces mêmes indicateurs peuvent être "calibrés" à partir de spectres composites ce qui nous donnent des estimations quantitatives sur la contribution des UIBs dans le domaine de l'infrarouge moyen. La connaissance de l'importance relative des UIBs devient très importante puisque comme on l'a vu précédemment, les AGNs et les régions HII pures en sont dépourvus.

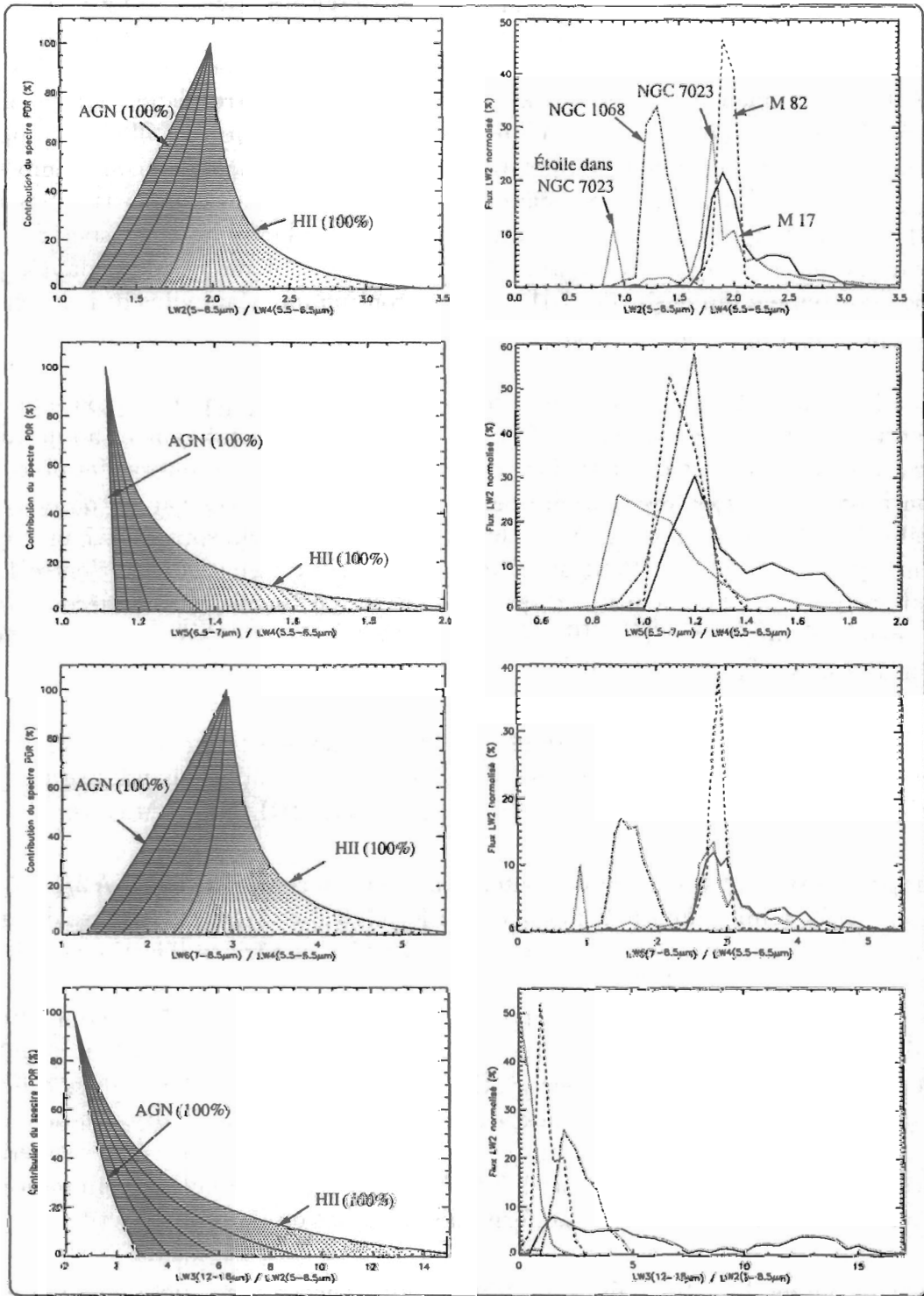


FIG. 6.6 – Applications des indicateurs UIB/Continuum à partir des filtres larges LW. A gauche, on a estimé la fraction de l'énergie intégrée de 5 à $16\mu m$ contenue dans les spectres composites en fonction des différents indicateurs. Pour un pourcentage de spectre PDR donné, on peut avoir des contributions variables AGN, HII (de 0 à 100% de la fraction restante). A droite, on a appliqué le diagnostic sur NGC 1068, M 82, NGC 7023 et M 17. L'échantillonnage sur l'axe X est de 0.1 pour les trois premiers en partant du haut et 0.5 pour $LW3/LW2$.

Un autre type d'indicateur d'UIBs basé sur des données ISOPHOT-S a été également développé par Genzel et al. (1998a). Cet indicateur décrit sur la figure 6.7 permet de façon similaire de quantifier systématiquement l'intensité relative des UIBs par rapport au continuum sous-jacent.

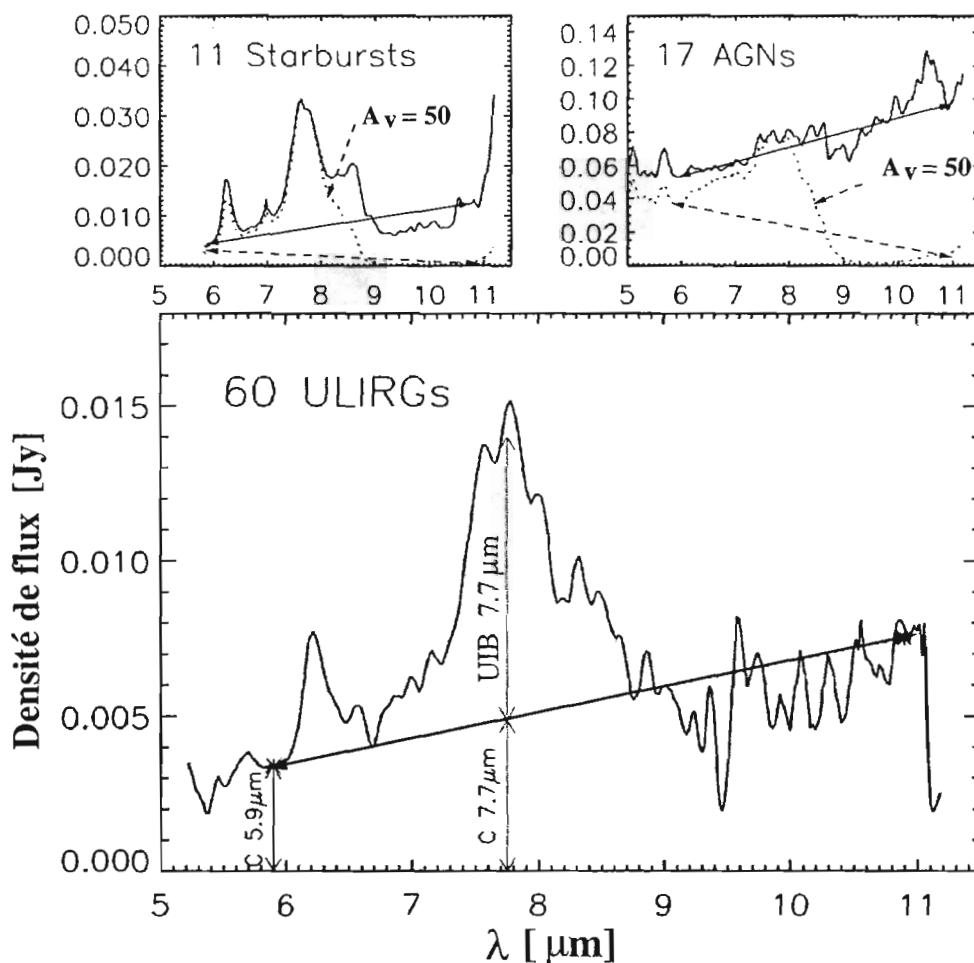


FIG. 6.7 – Spectres ISOPHOT-S moyennés de galaxies ultralumineuses (ULIRGs) obtenus par Lutz et al. (1998). En haut à gauche, les spectres de starbursts sont essentiellement composés par des UIBs. En haut à droite, les spectres d'AGNs ne présentent pas d'UIBs clairement identifiables. Les lignes de 5.9 à 11 μm (continues et pointillées avec une absorption additionnelle $A_V = 50$ mag) illustrent l'estimation du continuum utilisée par Genzel et al. (1998a). Le rapport UIB/Continuum est obtenu en prenant la valeur de l'intensité de l'UIB entre 7.57 et 7.94 μm divisée par le continuum à 7.7 μm .

Le continuum est dans ce cas représenté par l'émission en-dessous de la droite continue fixée entre 5.9 et 11 μm . Ils obtiennent ainsi le rapport UIB/Continuum en prenant l'intensité du pic à 7.7 μm au-dessus de la droite divisée par le continuum en-dessous. On voit bien que dans le cas des galaxies dominées par un AGN, cet indicateur est très faible alors qu'il devient important dans les galaxies starbursts. Cependant, il est à noter que l'effet d'une forte absorption sur le continuum peut artificiellement augmenter le

rapport en donnant l'impression d'avoir plus d'activité starburst. On voit bien que les spectres absorbés sont très faibles à $11\mu\text{m}$ ce qui conduit à sous-estimer le continuum en dessous de la droite tout en indiquant une fausse remontée des UIBs.

Parmi les différents indicateurs "UIB/Continuum", nous voulons être le moins sensible possible aux effets de l'extinction par les silicates. L'absorption devenant plus intense au-delà de $8\mu\text{m}$, nous avons restreint notre choix sur l'UIB à $6.2\mu\text{m}$. L'estimation du continuum sur la bande à $7.7\mu\text{m}$ est plus difficile, mais cette méthode possède l'avan-

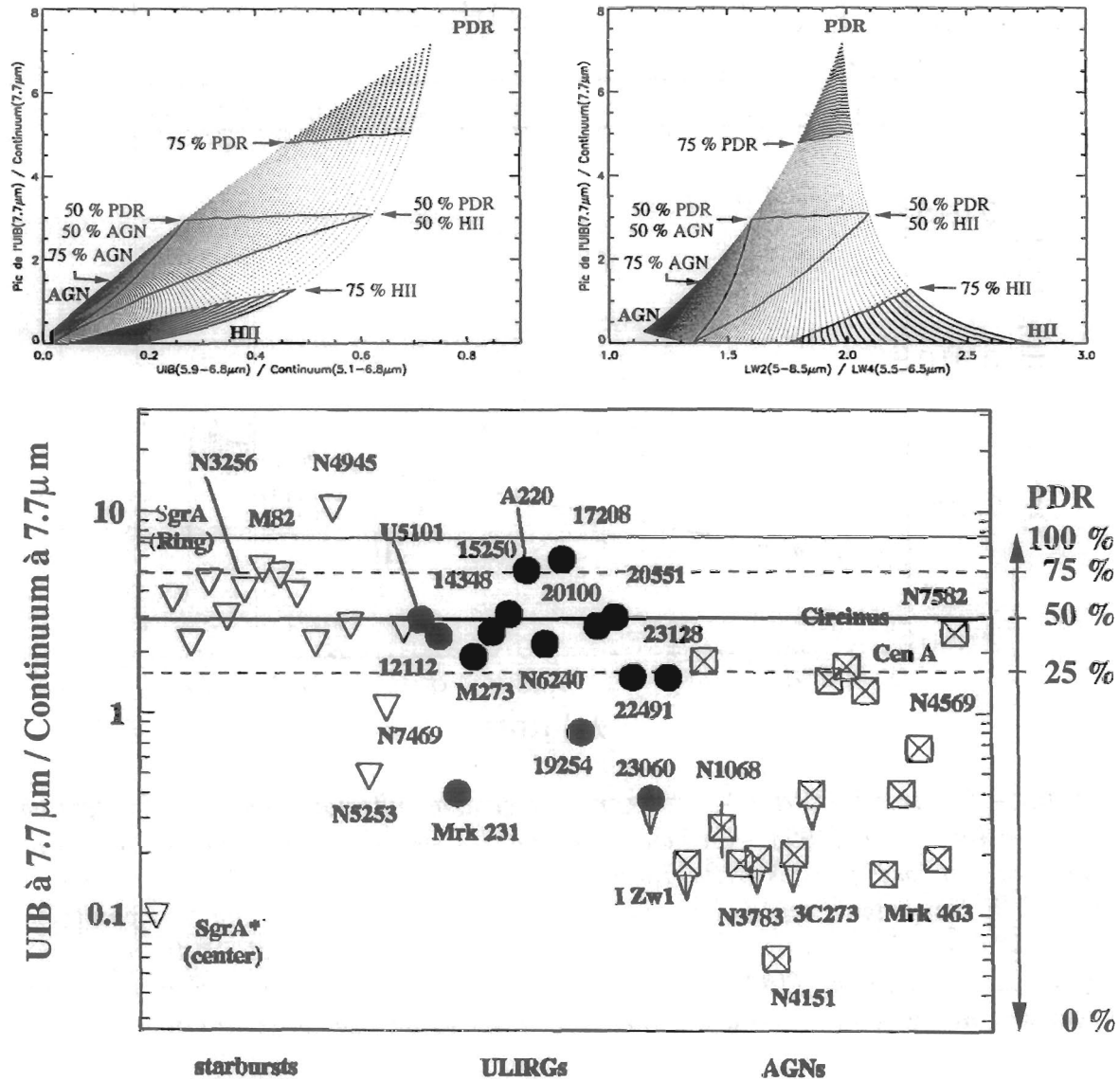


FIG. 6.8 - Diagramme $\text{UIB}(7.7\mu\text{m})/\text{Continuum}(7.7\mu\text{m})$ obtenu par Genzel et al. (1998a) pour un échantillon de galaxies starbursts (triangles), actives (carrés) et ultra-lumineuses (cercles). En haut, les deux diagrammes représentent l'évolution du rapport $\text{UIB}(7.7\mu\text{m})/\text{Continuum}(7.7\mu\text{m})$ en fonction de nos deux diagnostics ISOCAM. Les différentes fractions AGN, PDR et HII sont également indiquées.

tage d'utiliser l'UIB la plus intense et donc la mieux détectée. Pour les filtres larges, le rapport $LW2(5-8.5\ \mu m)/LW4(5.5-8.5\ \mu m)$ est également moins sensible à l'extinction en restant dans l'intervalle $5-8.5\ \mu m$. On peut utiliser le filtre $LW6$ à la place de $LW2$ pour tracer l'UIB à $7.7\ \mu m$ ainsi que le filtre $LW1(4-5\ \mu m)$ à la place de $LW4$ pour estimer le continuum. Le filtre large $LW2$ possède l'avantage d'être très souvent utilisé dans les observations ISOCAM et donne un flux avec un bon rapport signal sur bruit. Le filtre $LW4$ n'intègre pas uniquement le continuum mais aussi la bande à $6.2\ \mu m$ ce qui permet de détecter plus de galaxies par rapport au filtre $LW1$ sensible uniquement au continuum. Le filtre $LW1$ peut être utilisé pour estimer le continuum stellaire important à $4-5\ \mu m$ ainsi que le continuum chaud provenant de l'AGN. Néanmoins, il n'a pas été choisi pour observer notre échantillon de galaxies et de plus les spectres CVF commençant à $5\ \mu m$ ne peuvent être utilisés pour calculer le flux équivalent reçu dans ce filtre. Pour ces différentes raisons, nous choisissons le rapport $LW2/LW4$ comme estimateur UIB/Continuum.

Sur la figure 6.8, nous avons comparé nos deux indicateurs – $UIB(6.2)/Continuum(6.2)$ et $LW2/LW4$ – par rapport à l'indicateur $UIB(7.7)/Continuum(7.7)$ développé par Genzel et al. (1998a). L'utilisation de la bibliothèque de spectres composites permet de quantifier l'influence des UIBs sur le continuum. On retrouve bien les régions dominées par les UIBs (i.e. les PDRs) où se concentrent essentiellement les starbursts entre 50 et 100 %. Entre 25 % et 50 %, nous trouvons essentiellement les ULIRGs. En dessous de 25 % de PDRs, on sélectionne essentiellement les galaxies actives ainsi que les régions "pures" HII avec une faible contribution de PDRs telles que le centre Galactique Sgr A* et NGC 5253. Bien que dans la plupart des cas, l'absence d'UIBs dans le spectre intégré d'une galaxie souligne la présence d'une forte contribution AGN, on peut néanmoins avoir des galaxies starbursts où la contribution des PDRs reste faible (voir l'exemple de la galaxie bleue compacte II Zw 40 à la figure 3.19).

Il est donc nécessaire d'utiliser un autre critère pour lever la dégénérescence AGN/HII qui sont tous les deux caractérisés par une absence d'UIBs.

6.4.2 Diagnostics séparant les régions HII des AGNs/PDRs

Dans ce paragraphe, nous allons nous appuyer sur la deuxième caractéristique spectrale des AGNs à savoir le fort continuum entre $5-10\ \mu m$ comparé à celui des régions starbursts. Cette propriété se rencontre uniquement dans les AGNs et non pas dans les régions HII, ce qui va nous permettre de les distinguer. Il faut donc obtenir un critère permettant de comparer le continuum situé au dessus et en dessous de $10\ \mu m$. A partir des spectres CVF nous pouvons définir le continuum compris entre 14 et $15\ \mu m$ et pour les filtres larges, $LW3$ donne une bonne estimation du continuum entre 12 et $18\ \mu m$. La difficulté consiste à estimer le continuum à $5-10\ \mu m$ qui est complètement masqué par les UIBs. Le flux en-dessous de l'UIB à $6.2\ \mu m$ va nous donner une estimation du continuum tout en sachant qu'une partie du flux provient de la bande à $7.7\ \mu m$. Pour les filtres larges, on utilisera $LW2(5-8.5\ \mu m)$ qui intègre à la fois le continuum et les UIBs. De plus, le rapport $LW3/LW2$ est le plus utilisé avec les données ISOCAM. Ainsi le continuum réel sous les UIBs sera sur-estimé de façon systématique, mais ce qui nous

intéresse finalement ce sont les variations des rapports entre eux pour les différents types d'émission.

Sur la figure 6.9, on peut voir que les deux méthodes permettent de bien séparer les deux types de spectres HII ou AGN quand le continuum domine l'émission. Cependant, pour la plupart des starbursts, la contribution des UIBs domine l'émission $< 10 \mu\text{m}$ ce qui ne permet pas de distinguer les starbursts comme M 82 des AGNs en utilisant ces critères. On utilise dans ce cas, les indicateurs précédents UIB/Continuum pour les séparer.

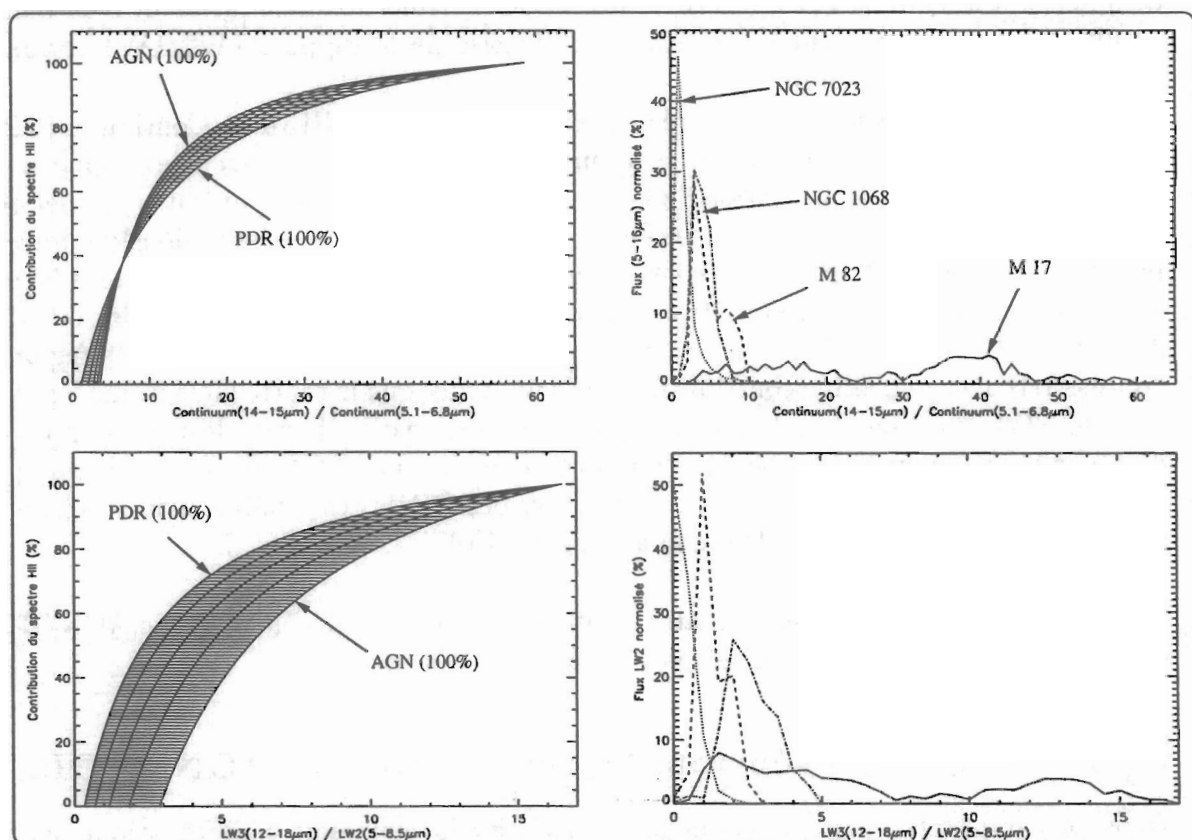


FIG. 6.9 – Etude de la contribution du continuum à $14\text{--}15 \mu\text{m}$ comparée avec l'émission à $5\text{--}8 \mu\text{m}$ composée d'UIBs et du continuum chaud $< 10 \mu\text{m}$. A gauche, on a estimé la fraction de l'énergie intégrée de 5 à $16 \mu\text{m}$ contenue dans les spectres composites en fonction des différents indicateurs. Pour un pourcentage de spectre HII donné, on peut avoir des contributions variables AGN, PDR (de 0 à 100% de la fraction restante). A droite, on a appliqué le diagnostic sur NGC 1068, M 82, NGC 7023 et M 17. L'échantillonnage sur l'axe X est de 1 pour le rapport Continuum($14\text{--}15 \mu\text{m}$)/Continuum($5.9\text{--}6.8 \mu\text{m}$) et 0.5 pour LW3/LW2. Cet indicateur permet de séparer les régions "pures" HII (ex: centre Galactique) des AGNs (ex: NGC 1068).

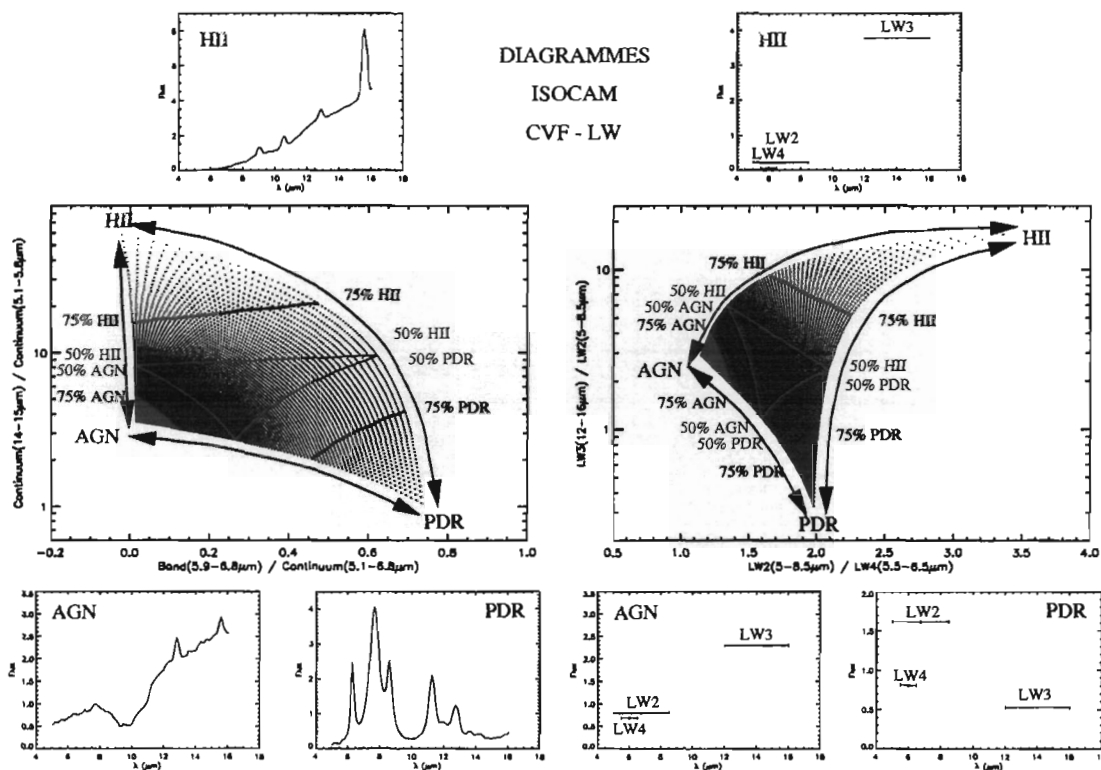


FIG. 6.10 – Diagrammes de diagnostics (AGN/HII/PDR) basés sur des spectres CVF de 5 à 16 μm . A partir des modèles d'émission des trois composantes pris comme références dans M17 (HII), NGC 7023 (PDR) et Cen A (AGN), l'ensemble des spectres synthétiques délimitent des régions distinctes à dominante HII, PDR ou AGN. A gauche, le diagramme est basé sur l'étude des spectres CVF alors qu'à droite, on a utilisé les filtres larges déduits de ces mêmes spectres (LW3 limité ici à 16 μm par le CVF peut être considéré comme équivalent à LW3[12-18 μm] en ne prenant pas en compte la faible transmission du filtre entre 16 et 18 μm).

6.4.3 Diagrammes de diagnostics à deux dimensions

Les deux critères développés précédemment sont complémentaires. En effet, ils permettent ensemble de séparer la contribution de chaque constituant (HII, AGN, PDR). En combinant les deux rapports dans un même diagramme, nous pouvons classer les différents types d'émission. Sur la figure 6.10, les différents diagnostics utilisent soit les données des spectres CVF à gauche soit les filtres larges à droite. Il en résulte clairement une séparation spatiale entre les spectres dominés à 75% par une composante AGN (rouge), PDR (bleu) ou HII (vert). Les courbes à 50% qui délimitent une région où aucun des spectres de base n'est dominant, sont représentées en rose. La composante stellaire est supposée toujours négligeable dans les galaxies dominées par l'activité de formation d'étoiles et/ou le noyau actif.

Sur la Figure 6.11, nous avons placé sur le diagramme de diagnostics 33 spectres couvrant au mieux la diversité spectrale de l'émission rencontrée dans l'infrarouge moyen. Pour cela, les noyaux ont été séparés des disques pour les galaxies les plus proches

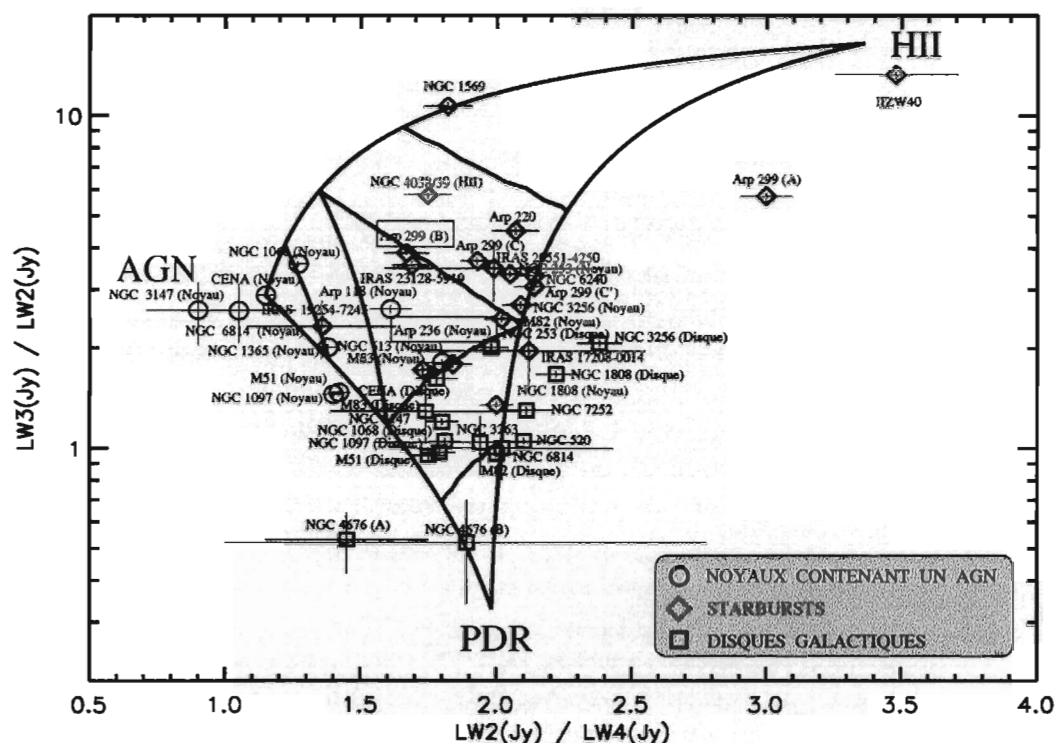


FIG. 6.12 – Diagramme de diagnostics (AGN/HII/PDR) basé sur des filtres larges. Ce diagramme regroupe 44 sources observées soit directement dans les 4 filtres larges, soit en mode CVF. Les erreurs ont été estimées à 1σ à partir de la carte rms en filtres larges ou en CVF en tenant compte également d’une incertitude fixée à 10% due à la mauvaise correction des effets de mémoire.

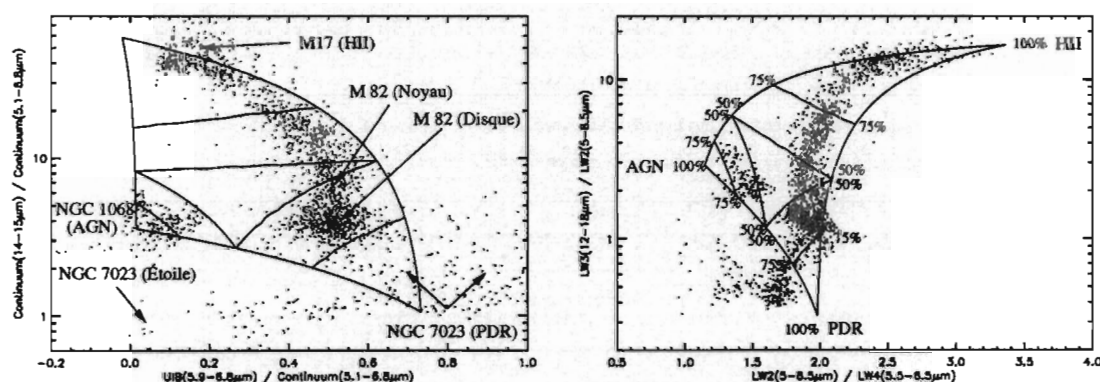


FIG. 6.13 – Application des diagnostics à 4 objets proches résolus dominés par un spectre AGN (NGC 1068), un spectre HII (M 17) et un spectre PDR (M 82 et NGC 7023).

principales dominées par les UIBs, le continuum des régions HII et celui de l'AGN. Il est intéressant de noter que les spectres à faibles rapports $LW2/LW4 < 1.6$ contiennent une fraction importante de contribution AGN supérieure à 50 %. Par contre, on ne peut distinguer les AGNs des starbursts avec le rapport classique $LW3/LW2$.

Sur la Figure 6.13, les quatre objets proches NGC 1068, M 17, M 82 et NGC 7023 déjà utilisés sont bien localisés respectivement dans les zones AGNs, HII, HII+PDR et PDR. On peut noter toutefois des différences notables par rapport à la distribution des spectres composites. Les spectres de NGC 7023 montrent une grande dispersion sur l'axe X ce qui s'explique par une variabilité intrinsèque de la forme des UIBs sur l'étendu de NGC 7023. De plus, la galaxie M 82 bien que située dans la région dominée par les PDRs se trouve plus proche de la région AGN que de la région HII dans le diagramme CVF par rapport à celui avec LW. Cela est dû à la difficulté d'estimer le continuum par rapport à la contribution dominante des UIBs. A savoir, qu'une faible augmentation du "continuum" (le flux avant $5.5\mu\text{m}$) change fortement la position du point extrême PDR pris comme référence et de ce fait déplace la région PDR vers la gauche. Le diagramme basé sur les filtres LW est moins sensible aux variations intrinsèques, de plus il s'applique à plus d'objets observés uniquement en filtres larges. C'est pour ces deux raisons que nous allons préférer son utilisation par la suite.

A partir de ce diagramme, nous retrouvons une classification cohérente de l'ensemble des résultats obtenus dans les chapitres précédents. Les noyaux des deux galaxies starbursts M 82 et NGC 253 sont placés entre les galaxies ultralumineuses dominées par le starburst (en haut, NGC 6240, Arp 299(C), IRAS 23128-5919 et Arp 220) et les galaxies spirales normales dominées par la formation d'étoiles de leur disque. Les deux noyaux des galaxies actives Cen A et NGC 1068 se retrouvent également dans la région à l'extrême gauche où se concentrent les AGNs. On notera que la galaxie ultralumineuse IRAS 19254-7245 suspectée d'être dominée par un AGN est située dans la zone des galaxies actives en infrarouge moyen. Les deux noyaux des galaxies Arp 299(B) et Arp 236 apparaissent dans le diagramme assez proche des spectres dominés par l'AGN. Aucune évidence d'AGN n'a été jusqu'à présent trouvée dans ces deux noyaux. Il représente ainsi deux candidats d'AGNs obscurcis.

La comparaison des observations avec la bibliothèque spectrale à trois composantes de base, permet d'obtenir au 1^{er} ordre une classification des spectres (voir l'article soumis à A&A en fin de chapitre, Laurent et al., 1999). Une meilleure estimation quantitative nécessite une modélisation prenant en compte la variabilité des bandes infrarouges et également l'effet de l'absorption qui déforme l'intensité relative des UIBs et modifie la forme du continuum sous les UIBs. Cependant, cette étude ne peut s'appliquer qu'aux observations en mode CVF, ce qui limite considérablement le nombre d'objets.

Ce diagramme de diagnostics obtenu à partir des données ISOCAM peut être comparé à celui de Genzel et al. (1998) qui utilise les données ISOPHOT-S et ISO-SWS. Sur la figure 6.14, ce diagramme combine le rapport de raies corrigées de l'extinction $[\text{OIV}](25.9\mu\text{m})/[\text{NeII}](12.8\mu\text{m})$ ou $1.7 \times [\text{SIII}](33.5\mu\text{m})$ avec l'intensité relative de l'UIB à $7.7\mu\text{m}$ représentée sur la figure 6.8.

La limite Starburst/AGN pour le critère UIB/Continuum a été estimée à 1 (Lutz et al., 1998a; Rigopoulou et al., 1999). Cette limite est cruciale car elle est utilisée pour séparer les AGNs des starbursts. C'est également elle qui implique que les ULIRGs sont dominées à 80% par l'activité starburst (Genzel et al., 1998a). Hors, notre estimation de la contribution AGN en fonction du paramètre UIB/Continuum diffère de celle initialement placée dans le diagramme. La limite à 75% AGN-HII permet de sélectionner

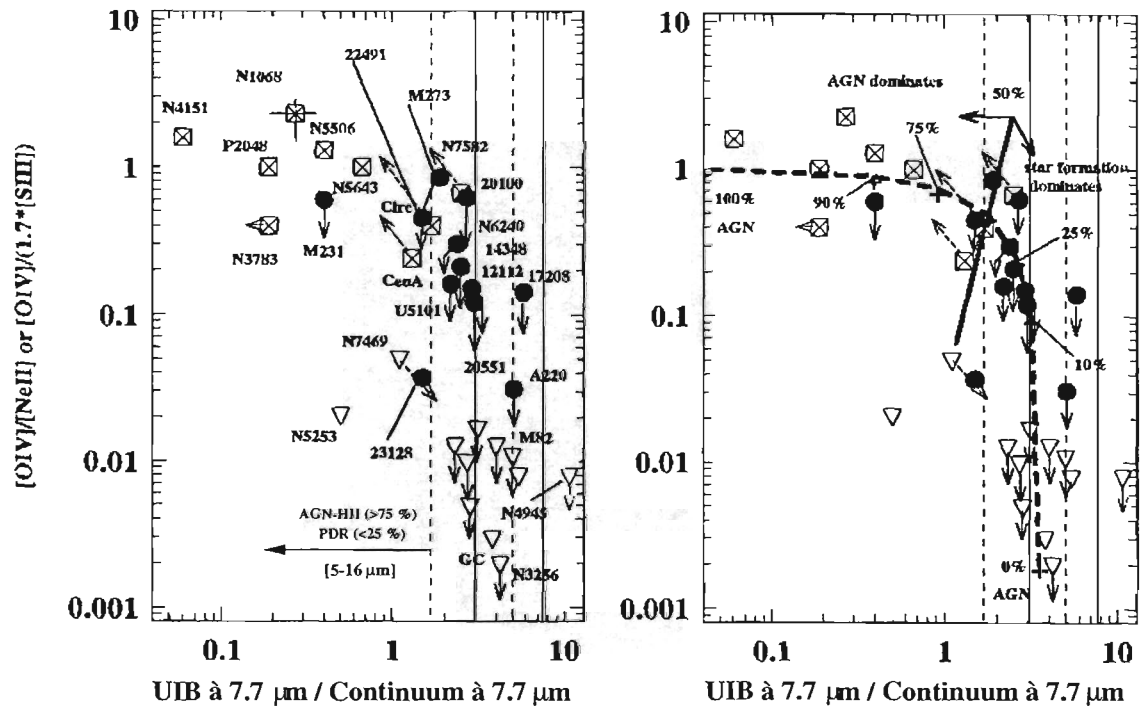


FIG. 6.14 – Diagramme de diagnostics développé par Genzel et al. (1998). Les galaxies starbursts sont indiquées par des triangles, les AGNs par des carrés et les galaxies ultralumineuses par des cercles. Quelques galaxies possèdent les deux contributions (NGC 7582, Cen A et Circinus). A gauche, les noms de chaque galaxie sont indiqués. A droite, la courbe en pointillé délimite les différentes contributions AGN sachant que 100% AGN est défini par $[OIV]/[NeII] \sim 1$ et $UIB/Continuum \sim 0.04$, 0% AGN correspond à $[OIV]/[NeII] \sim 0.002$ et $UIB/Continuum \sim 3.6$. Une droite (trait épais) fixe la limite 50% AGN. Les quatre lignes verticales délimitent de la droite vers la gauche, la contribution HII-AGN entre 5 et $16 \mu m$ à 75%, 50%, 25% et 0% (voir aussi Fig. 6.8).

les AGNs ainsi que les régions HII comme NGC 5253 et le centre galactique représentés sur la figure 6.8. Cela implique qu'il est plus difficile d'estimer l'intensité de la contribution de l'AGN pour les galaxies ultralumineuses en utilisant uniquement le critère basé sur les UIBs. En effet, le faible continuum sous les UIBs peut provenir des régions HII comme des AGNs. Pour cela, l'autre diagnostic utilisant le rapport de raies à fort et faible potentiel d'ionisation permet de révéler la présence d'un AGN. Cependant, la non détection des raies [OIV] ou [NeV] dans la plupart des ultralumineuses ne permet pas de les différencier des galaxies starbursts.

Sur la figure 6.15, nous avons appliqué sur les spectres ISOCAM de Cen A la méthode utilisée par Genzel et al. pour estimer l'intensité relative des UIBs. La luminosité intégrée de 5 à $16 \mu m$ dans la région centrale ($\sim 50''$ de diamètre) provient à 50% de l'AGN. Pour le spectre total et chaque composante Starburst-AGN spatialement séparée, le rapport $UIB/Continuum$ est calculé. On retrouve bien les valeurs typiques pour les starbursts (7.7) et les AGNs (0.3). Par contre, le spectre incluant les deux

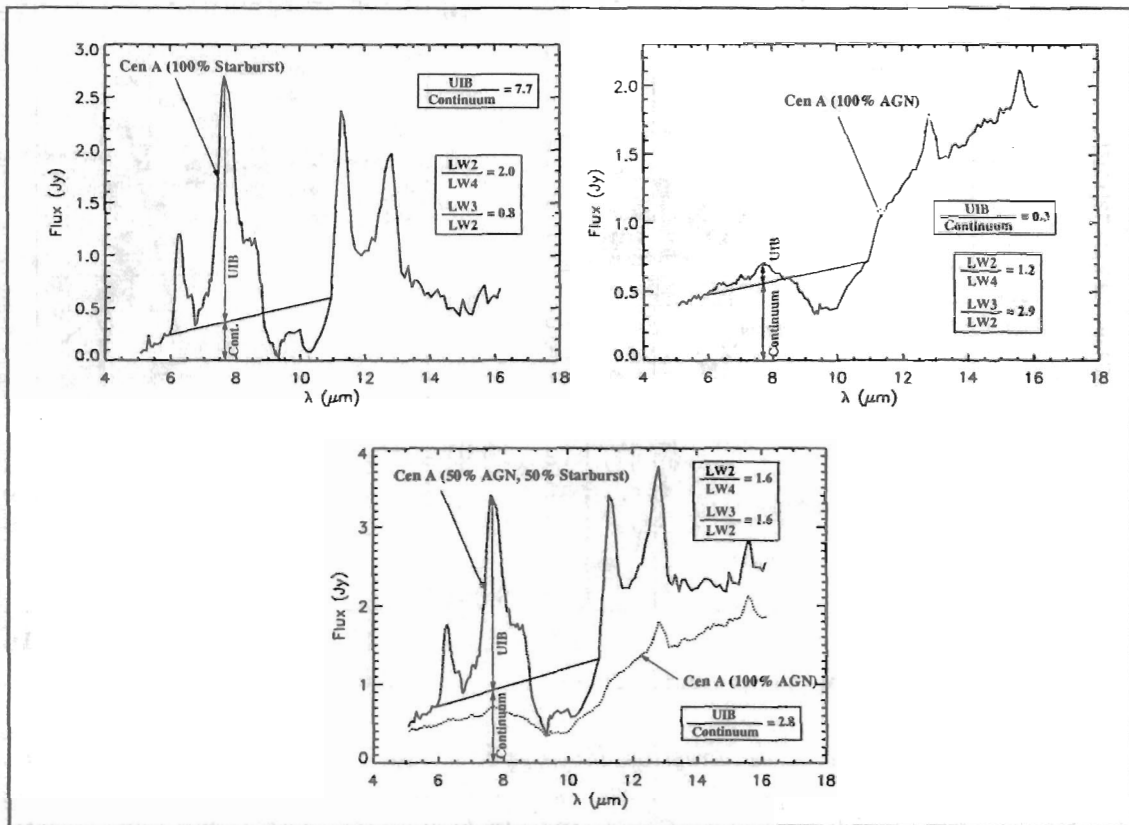


FIG. 6.15 – Application du diagnostic $UIB(7.7\mu m)/Continuum(7.7\mu m)$ sur les spectres ISOCAM de Cen A. Les valeurs des deux indicateurs ISOCAM $LW3/LW2$ et $LW2/LW4$ utilisés dans le diagramme 6.12 sont également indiquées.

composantes possède un rapport de 2.8 bien supérieur à 1. Si on prend la limite 2.8 et si l'on suppose que le continuum HII est négligeable par rapport au continuum AGN, les ULIRGs se caractérisent cette fois-ci avec une fraction beaucoup plus importante d'AGN dominant (10/15, 67%) au lieu de (3/15, 20%) avec 1 comme limite. La non détection de raies à fort potentiel d'ionisation peut être causée par une forte extinction au cœur même de l'AGN où ces raies sont produites. En plus, l'intense continuum de poussière chaude chauffée par l'AGN provoque la diminution de la largeur équivalente (intensité de la raie sur son continuum) des raies rendant ainsi plus difficile leur détection. Pour illustrer l'effet de l'AGN sur la contribution starburst, nous avons utilisé les spectres ISO-SWS qui permettent de bien séparer les raies. La figure 6.16 montre le spectre de la galaxie M82 utilisée comme prototype starburst ainsi que celui de la galaxie Circinus qui présente à la fois un contribution AGN et starburst. Les raies à fort potentiel d'ionisation associées à l'AGN sont clairement identifiées dans Circinus. Cependant, l'intensité des raies par rapport au continuum diminue considérablement avec la présence de l'AGN. Il devient évidemment plus difficile de séparer les raies pour des galaxies plus lointaines où le signal sur bruit du continuum augmente.

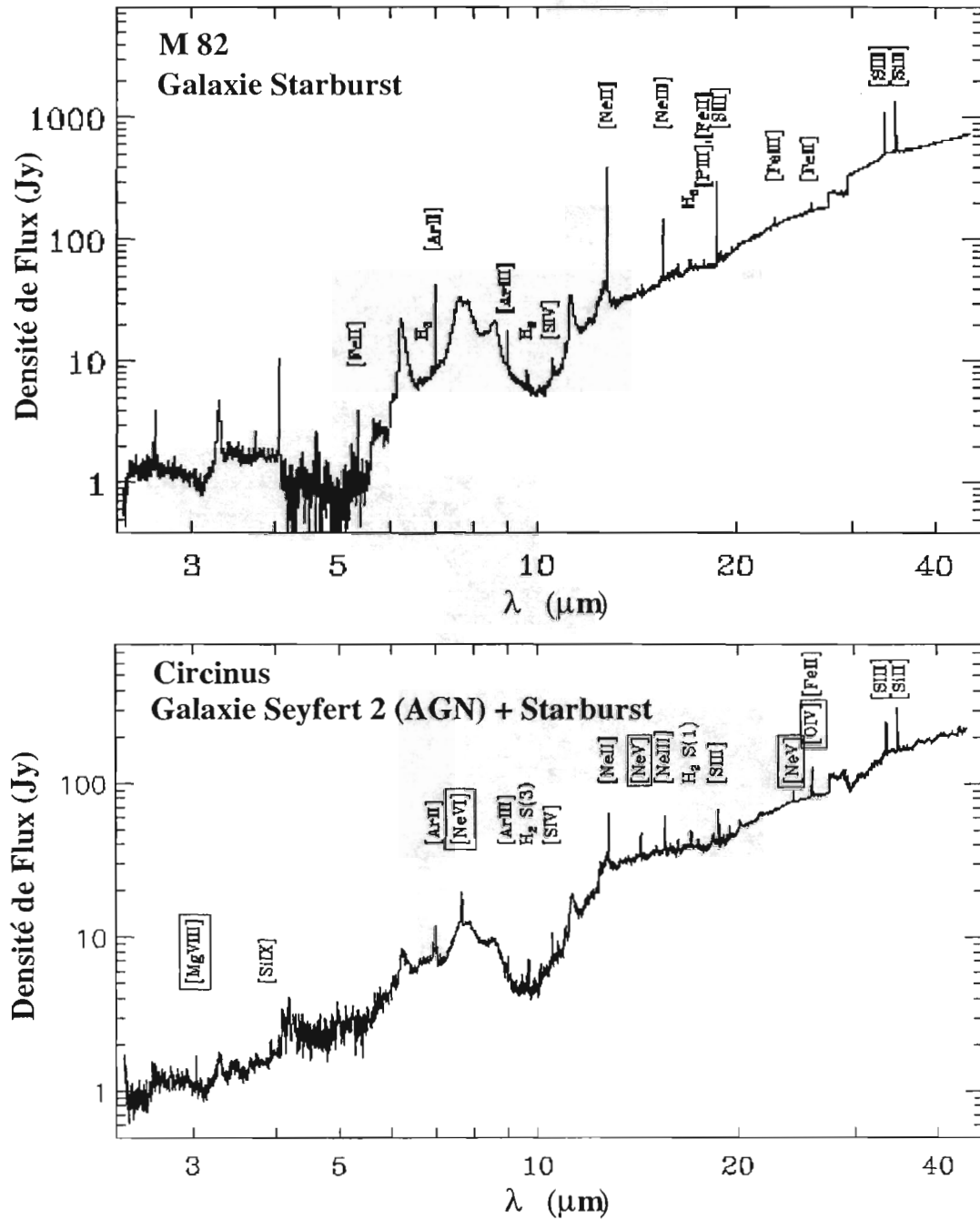


FIG. 6.16 – Spectre ISO-SWS de M82 et de Circinus (Moorwood et al., 1996). La présence de l'AGN produit un fort continuum responsable de la diminution de la largeur équivalente de l'ensemble des raies. La contribution des UIBs bien que toujours visible est également diluée dans le continuum de l'AGN. Les raies à fort potentiel d'ionisation provenant de l'AGN ont été encadrées.

Nous avons vu que ces différents types de diagrammes permettent de séparer de façon quantitative les galaxies dominées par l'AGN de celles dominées par un starburst, même si les critères de sélection varient d'une méthode à l'autre. Différentes études peuvent être menées à partir de ces diagnostics. Notre échantillon ne contenant que 30 objets, il ne nous est pas possible de faire une étude statistique sur une population d'objets particuliers comme les galaxies de Seyfert ou les ultralumineuses (Schulz et al., 1999, Lutz et al., 1998a). A partir des données ISOPHOT-S, on peut par exemple compléter notre échantillon en estimant le rapport $LW2(5-8.5\ \mu m)/LW4(5.5-6.5\ \mu m)$ utilisé dans notre diagramme qui sélectionne essentiellement les AGNs en-dessous de 1.6. Diverses applications du diagnostic infrarouge développé par Lutz et al. (1998) ont déjà été obtenues (voir Fig. 6.17). A partir d'un large échantillon de galaxies ultralumineuses, on constate que la fraction d'ULIRGs contenant une contribution AGN dominante augmente avec la luminosité. La diminution du rapport UIB/Continuum est bien réelle, le problème comme on l'a vu consiste à définir la limite Starburst/AGN ce qui permet ensuite d'estimer la luminosité de transition fixée à $\log(L_{IR})=12.3$ d'après Lutz et al. (1998). Si on remonte la limite UIB/Continuum à 3, dans ce cas, la plupart des ULIRGs sont dominées par l'AGN au-delà de $\log(L_{IR})=12$. La diminution du rapport UIB/Continuum est aussi corrélée avec l'augmentation du continuum chaud à $5.9\ \mu m$ par rapport au continuum froid à $60\ \mu m$ (voir Fig. 6.17). Cette corrélation est due essentiellement à une augmentation du continuum chaud provenant de l'AGN. Ainsi, on ne peut exclure une forte contamination AGN dans les ULIRGs possédant un fort continuum à $6\ \mu m$, et la difficulté majeure reste de déterminer avec précision quelle est la fraction des ULIRGs qui possèdent ce continuum.

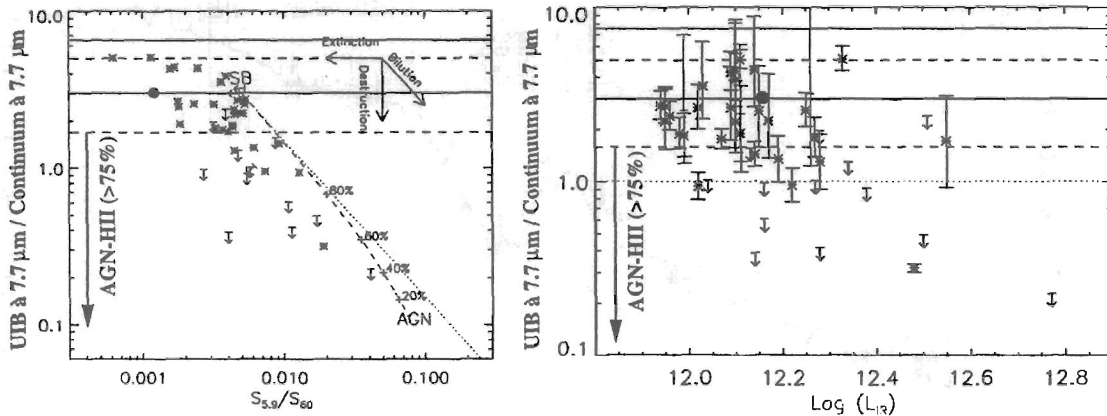


FIG. 6.17 – Evolution du rapport UIB/Continuum en fonction du rapport Continuum($5.9\ \mu m$)/Continuum($60\ \mu m$) et de la luminosité infrarouge (voir Lutz et al., 1998a).

A partir des données provenant de l'article de Lutz et al. (1998) et de la comparaison avec les diagnostics ISOCAM, nous trouvons que $\sim 30\%$ des ULIRGs contiennent un AGN dominant au moins 75% de l'émission en infrarouge moyen et non pas 50% . Dans le cas des ULIRGs contenant entre 50% et 75% de contribution AGN, nous ne pouvons pas les séparer des starbursts à partir du diagnostic $UIB(7.7\ \mu m)/Continuum(7.7\ \mu m)$.

Il est clair que les ULIRGs contiennent une fraction non négligeable de leur émission qui vient des starbursts, mais on ne peut conclure sur la prédominance ($> 50\%$) des starbursts sur les AGNs dans les ULIRGs pour les “faibles” luminosités ($\log(L_{IR}) < 12.3$). Par contre, pour des luminosités supérieures à $\log(L_{IR}) = 12.3$, on obtient 65 % des ULIRGs dominées par une forte contribution AGN d’au moins 75%. Bien que les galaxies ultralumineuses soient définies avec $\log(L_{IR}) > 12$ et non pas $\log(L_{IR}) > 12.3$, ces données suggèrent que l’AGN contribue de façon notable à l’émission des galaxies les plus lumineuses dans l’univers local. Il reste à définir la limite de transition en luminosité (si elle existe) ou l’intervalle de transition entre les galaxies lumineuses ($11 < \log(L_{IR}) < 11.5-12$) dominées par l’activité starburst et les “fortes” ultralumineuses dominées par l’AGN ($\log(L_{IR}) > 12.3$).

6.4.4 Les limitations de la classification Starburst/AGN

Le diagramme de diagnostics basé sur les spectres ISOCAM est limité dans sa capacité à trouver un AGN dilué dans une forte contribution starburst. On estime que l’on commence à détecter un AGN lorsque celui-ci domine l’émission. Cet outil ne permet pas d’identifier des AGNs faibles pour deux raisons majeures:

- Les UIBs rendent très difficile la détection du continuum à $5-10\mu\text{m}$. De plus, une partie du continuum provient des régions HII. Dans ces conditions il est difficile de distinguer un AGN associé avec des régions starbursts. Pour NGC 1068 et Cen A, la résolution spatiale de la caméra nous a permis de contourner le problème en séparant les régions starbursts de l’AGN. Pour des galaxies plus lointaines ($D > 50\text{ Mpc}$), on ne peut résoudre la région nucléaire ($\sim 1\text{ kpc}$) du disque de la galaxie et par conséquent le continuum de l’AGN se dilue dans les UIBs. On estime à environ 50 pc la distance limite pour détecter des AGNs non dominant (i.e. la luminosité de l’AGN ne domine pas l’émission globale de la galaxie). Dans le cas où l’AGN domine l’émission infrarouge, les effets de dilution par des régions starbursts deviennent négligeables. Cette limitation dépend directement du pouvoir de résolution spatiale de l’instrument. En améliorant par un facteur 5 le pouvoir de résolution d’ISOCAM pour obtenir $\sim 1''$ avec des observations au sol, on peut espérer détecter de faibles AGNs dans les galaxies proches qui sont jusqu’à présent dilués dans le starburst circum-nucléaire. Pour plus de détails, un compte rendu de colloque présente les effets de dilution spatiale dans l’infrarouge moyen à la fin de ce chapitre.

- Durant notre étude, nous avons négligé la contribution stellaire dans les spectres dominés par la poussière. Néanmoins, l’émission stellaire peut produire un faible continuum à $5\mu\text{m}$ qui peut être interprété selon nos critères comme venant d’un AGN. Il est d’autant plus difficile de les distinguer que l’émission stellaire est généralement plus importante dans les bulbes de galaxies où se trouve aussi l’AGN. Un moyen simple pour connaître l’origine du continuum consiste à observer entre 2 et $5\mu\text{m}$ avec le filtre K($2.2\mu\text{m}$) et L($3.6\mu\text{m}$) la couleur de l’émission sachant qu’en magnitude $K-L < 0$ pour les étoiles et $K-L > 0$ pour la poussière. Pour les galaxies proches comme M 83 par exemple, on peut également noter l’extension spatiale de l’émission à $5\mu\text{m}$ indiquant

le bulbe de la galaxie et non l'AGN qui est ponctuel.

• L'un des problèmes majeurs concernant la détection des AGNs résulte de la forte extinction par la poussière capable de cacher leur présence. Le continuum observé dans l'infrarouge moyen peut être fortement atténué rendant ainsi difficile sa détection en augmentant la contribution relative des UIBs. Sur la figure 6.18, on a appliqué différents taux d'extinction sur un continuum similaire à celui de NGC 1068. La forme du continuum a été représenté par une loi de puissance d'index spectral α mais l'émission est bien d'origine thermique. Il n'est en effet pas possible d'utiliser un seul corps noir comme pour les starbursts probablement à cause de la large distribution de températures rencontrée au voisinage des AGNs. Les critères de diagnostics étant très dépendants du continuum à $5-8\mu\text{m}$, une forte extinction diminue le seuil de détection de l'AGN et conduit à sur-estimer la contribution starburst. Dans le cas de NGC 1068, la présence de l'AGN devient non détectable pour $A_V > 130\text{ mag}$ (i.e. $N_H > 2.4 \times 10^{23}\text{ cm}^{-2}$) dans le spectre intégré de la galaxie.

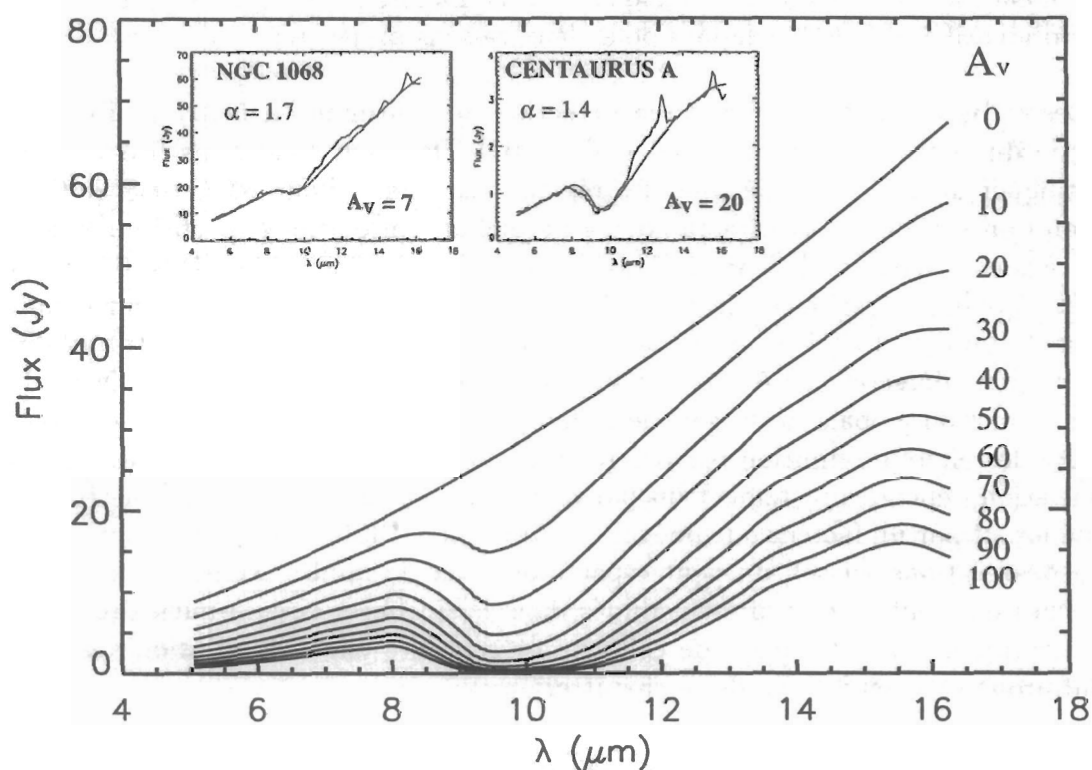


FIG. 6.18 – Effets de l'extinction sur le continuum de l'AGN. En haut, le continuum des deux AGNs dans NGC 1068 et Centaurus A se caractérise respectivement par une absorption équivalente à 7 et 20 magnitudes dans l'optique. Différents niveaux d'extinction utilisant un modèle d'écran sont appliqués sur le continuum. La loi d'extinction provient de Dudley (voir Fig. 3.12).

A&A manuscript no.
(will be inserted by hand later)

Your thesaurus codes are:
3(11.01.2; 11.19.3; 13.09.1)

ASTRONOMY
AND
ASTROPHYSICS

December 29, 1999

Mid-infrared diagnostics to distinguish AGNs from starbursts *

O. Laurent¹, I.F. Mirabel^{1,2}, V. Charmandaris^{3,4}, P. Gallais¹, S.C. Madden¹, M. Sauvage¹, L. Vigroux¹ and C. Cesarsky¹

¹ CEA/DSM/DAPNIA Service d'Astrophysique F-91191 Gif-sur-Yvette, France

² Instituto de Astronomía y Física del Espacio. cc 67, suc 28. 1428 Buenos Aires, Argentina

³ Observatoire de Paris, DEMIRM, 61 Av. de l'Observatoire, F-75014 Paris, France

⁴ Astronomy Department, Cornell University, Ithaca NY, 14853, USA

Received 1 June 1999/ Accepted ...

Abstract. We present new mid-infrared (MIR) diagnostics to distinguish emission of active galactic nuclei (AGN) from that originating in starburst regions. Our method uses empirical spectroscopic criteria based on the fact that MIR emission from star forming or active galaxies arises from HII regions, photo-dissociation regions (PDRs) and AGNs. The analysis of the strength of the 6.2 μ m Unidentified Infrared Band (UIB) and the MIR continuum shows that UIBs are very faint or absent in regions harboring the intense and hard radiation fields of AGNs and naked HII regions, where the UIB carriers could be destroyed. The MIR signature of AGNs is the presence of an important continuum in the 3-9 μ m band which originates from very hot dust heated by the intense AGN radiation field. Using these two distinct spectral properties found in our MIR templates, we build diagnostic diagrams which provide quantitative estimates of the AGN, PDR and HII region contribution in a given MIR spectrum. This new MIR classification can be used to reveal the presence of AGNs highly obscured by large columns of dust.

Key words: Galaxies: active – Galaxies: starburst – Infrared: galaxies

1. Introduction

Since the discovery by IRAS of ultraluminous infrared galaxies ($L(8-1000 \mu\text{m}) > 10^{12} L_{\odot}$) which emit the bulk of their energy in the infrared, a large number of studies have shown that intense star forming regions as well as AGNs are necessary to explain these high luminosities

(see Sanders & Mirabel 1996 for a review). Large concentrations of molecular gas are needed for fueling nuclear starbursts and/or AGNs. Consequently, the absorption makes the distinction between starburst and AGN activity difficult and the estimate of their relative contribution to the total infrared luminosity is far from straightforward. Optical classification (Veilleux et al. 1995, Goldader et al. 1995, Kim et al. 1998) is plagued by extinction, while radio wavelengths, although free from extinction, do not result in definite classification (Condon et al. 1991, Lonsdale et al. 1993, Smith et al. 1998). Based on ground-based MIR observations (Roche et al. 1991, Dudley 1999) and more recently with ISO (Lutz et al. 1998, Genzel et al. 1998b and references therein), considerable progress has been made in defining the fraction of the AGN/Starburst contributions to the MIR spectral energy distribution (SED) of luminous infrared galaxies.

To further examine the AGN and starburst connection, we have observed a sample of nearby active and interacting galaxies harboring starburst regions and/or AGNs using ISOCAM. Thanks to the unique spectro-imaging capabilities of the camera which provide an angular resolution of 4-8 arcsec between 5 and 16 μ m (200-400 pc at 10 Mpc), we can reveal and study obscured central regions not visible at optical wavelengths ($A_{15 \mu\text{m}} \sim A_V/70$, Mathis 1990).

The goal of this paper is to present an empirical method to distinguish and quantify the MIR emission coming from starbursts and AGNs. Our approach is based on a new MIR diagnostic for estimating the relative importance of these two main energy sources found in galactic centers. Our sample and the data reduction methods are described in section 2. A brief summary of the typical MIR emission encountered in these galaxies is presented in section 3, while our MIR templates and diagnostic diagrams are shown in section 4. We discuss our results and their implications in section 5 and the final conclusions are given in section 6.

Send offprint requests to: O. Laurent, olaurent@discovery.saclay.cea.fr

* Based on observations made with ISO, an ESA project with instruments funded by ESA Member States (especially the PI countries: France, Germany, the Netherlands and the United Kingdom) and with the participation of ISAS and NASA.

2. Observations and data reduction

A large sample of nearby galaxies hosting star formation activity and AGN signatures (see Table 1) was observed with the ISOCAM camera (Cesarsky C. et al. 1996) on board the Infrared Space Observatory (ISO, Kessler et al. 1996). All observations come from the ISOCAM consortium guaranteed time programs and most of them were part of the active galaxy proposal CAMACTIV (P.I. I.F. Mirabel, e.g. Charmandaris et al. 1997, Mirabel et al. 1998, Gallais et al. 1998, Mirabel et al. 1999). These galaxies have been observed either in the spectro-imaging mode with the Circular Variable Filter (CVF) or in the raster mode with broad band filters.

The CVF covers a spectral range from 5 to 16 μm with a spectral resolution of ~ 40 . For CVF scans, a single pointing was made for each galaxy, using 1.5-3 arcsec/pixels, giving a total field of view for the 32×32 pixel array of 0.8-1.6 arcmin. The spatial resolution is 5-8 arcsec limited by the full width at half maximum (FWHM) of the point spread function (PSF). High spatial resolution and sensitivity are essential in our analysis in order to isolate the central regions in nearby galaxies. Approximately 12 exposures of 2-5s each were made at each wavelength in addition to ~ 20 exposures at the start of each observation to decrease the initial detector transient effects.

The raster maps were made with various broad band filters designed to select distinct features such as the continuum emission of the very small grains using the LW3(12-18 μm) filter, and the UIBs with the LW2(5-8.5 μm) and LW4(5.5-6.5 μm) filters. Depending on the apparent size of the galaxy, a pixel field of view of 1.5 or 3 arcsec was selected. Most of the maps were 2×2 rasters with 6 pixel overlap consisting of approximately 200 exposures of 2-5s each. Another 30 exposures were added at the start of the observations to decrease the effects of transients.

The ISOCAM data were analyzed with the CAM Interactive Analysis software (CIA)¹ and were calibrated with the general methods described in Starck et al. (1999). To correct for the dark current, a dark model taking into account the observing time parameters was subtracted. Cosmic ray hits were removed by applying a multiresolution median filtering (Starck et al. 1996). Corrections of detector memory effects were made with the so-called inversion method (Abergel et al. 1996). The flat field correction was performed using the library of calibration data. Finally, individual exposures were combined using shift techniques in order to correct the jitter effect due to the satellite motions (amplitude ~ 0.5 arcsec). To derive the photometry of individual galaxy regions, aperture corrections as well

as deconvolution techniques (Starck et al. 1998), were applied to account for the overall extension of the PSF in a few cases. We estimate that the absolute uncertainty of our photometric measurements is $\sim 20\%$ while the error in the relative uncertainty mainly due to errors on transient effect correction is $\sim 10\%$. The uncertainty in the absolute pointing is estimated to be less than 10 arcsec.

3. MIR emission of normal, starburst galaxies and AGNs.

The MIR emission (5-16 μm) in galaxies can mainly arise from: 1) the evolved stellar population (Rayleigh-Jeans regime), which can dominate in early-type galaxies, 2) emission from the ionized interstellar gas, 3) non-thermal emission from radio sources and 4) reprocessed starlight emitted by dust in the MIR. Dust emission between 5 and 16 μm associated with star forming regions is considered to be produced by two main dust components which are stochastically heated by the stellar radiation field reaching temperature fluctuations of the order of 100-1000 K (Puget & Léger 1989, Désert et al. 1990). One is the family of the UIBs centered at 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 and 12.7 μm which are thought to be due to C=C and C-H stretching and bending vibrations in carbonaceous materials (Léger & Puget 1984, Allamandola et al. 1985, Papoular et al. 1989). The UIBs dominate MIR spectra of galaxies with low or intermediate star formation activity (Mattila et al. 1999) as those originating from diffuse galactic regions (Giard et al. 1988, Mattila et al. 1996, Onaka et al. 1996) and PDRs (Klein et al. 1999). The second dust component, manifested in the MIR continuum longward of about 10 μm , is attributed to Very Small Grains (here-after VSGs) with radius < 10 nm (Désert et al. 1990), and is prominent in regions actively forming stars, such as Galactic HII regions (e.g. Verstraete et al. 1996, Cesarsky D. et al. 1996b) and in starburst regions. The emission from ionized gas is mainly observed through forbidden lines such as [ArII](6.9 μm), [ArIII](8.9 μm), [SIV](10.5 μm), [NeII](12.8 μm), [NeIII](15.6 μm), [NeVI](7.6 μm) and [NeV](14.3 μm). Because of their high ionization potential, these lines can be used to trace the hardness of the radiation field. The presence of [NeVI] and [NeV] has also provided evidence for AGNs (Moorwood et al. 1996, Rigopoulou et al. 1996, Genzel et al. 1998a) or supernova remnants (Oliva et al. 1999).

In order to understand how the total MIR emission in our sample of starbursts and AGNs varies according to these different contributions, we first review the well-studied MIR properties in resolved nearby galaxies from early-type to later type disk galaxies and then address our observations in light of these properties.

¹ CIA is a joint development by the ESA astrophysics division and the ISOCAM consortium led by the ISOCAM PI, C. Cesarsky, Direction des Sciences de la matière, C.E.A. France.

Table 1. Our galaxy sample

Source	RA (J2000)	DEC (J2000)	LW2 (mJy)	LW3 (mJy)	LW4 (mJy)	LW3 LW2	LW2 LW4	Spectral type LW	CVF
NGC 1068(Nuc : 9 ")	02 ^h 42 ^m 40.6 ^s	-00° 00' 47.8"	13009	46616	10221	3.58	1.27	AGN	AGN
Arp 118(Nuc : 3 ")	02 ^h 55 ^m 12.2 ^s	-00° 11' 00.8"	16	42	10	2.62	1.62	AGN	AGN
NGC 3147(Nuc : 9 ") [†]	10 ^h 16 ^m 53.6 ^s	73° 24' 03.3"	8	22	9	2.60	0.90	AGN	-
Centaurus A(Nuc : 4.5 ")	13 ^h 25 ^m 27.6 ^s	-43° 01' 08.8"	575	1658	500	2.89	1.15	AGN	AGN
NGC 6814(Nuc : 9 ") [†]	19 ^h 42 ^m 40.6 ^s	-10° 19' 24.6"	33	85	31	2.59	1.05	AGN	-
NGC 253(Nuc : 7.5 ")	00 ^h 47 ^m 33.1 ^s	-25° 17' 17.8"	4703	15716	2296	3.34	2.05	HII	HII
Arp 236(Nuc : 4.5 ")	01 ^h 07 ^m 47.5 ^s	-17° 30' 25.6"	200	358	108	1.79	1.84	PDR	AGN*
NGC 1808(Nuc : 9 ")	05 ^h 07 ^m 42.3 ^s	-37° 30' 46.1"	1154	1567	584	1.36	2.23	PDR	PDR
M82(Nuc : 9 ")	09 ^h 55 ^m 52.2 ^s	69° 40' 46.9"	5198	12720	2573	2.45	2.02	HII	HII
NGC 3256(Nuc : 4.5 ")	10 ^h 27 ^m 51.8 ^s	-43° 54' 08.7"	442	1196	212	2.70	2.09	HII	HII
Arp 299(A : 4.5 ")	11 ^h 28 ^m 34.2 ^s	58° 33' 46.5"	325	1860	108	5.73	3.00	HII	HII
Arp 299(B : 4.5 ")	11 ^h 28 ^m 31.5 ^s	58° 33' 40.4"	505	1951	303	3.86	1.67	HII	HII
Arp 299(C' : 4.5 ")	11 ^h 28 ^m 31.8 ^s	58° 33' 49.9"	76	232	36	3.06	2.14	HII	HII
Arp 299(C : 4.5 ")	11 ^h 28 ^m 31.2 ^s	58° 33' 48.9"	126	461	65	3.66	1.93	HII	HII
NGC 4038(Knot A : 6 ")	12 ^h 01 ^m 54.9 ^s	-18° 53' 12.3"	23	135	13	5.78	1.75	HII	HII
Arp 220	15 ^h 34 ^m 57.2 ^s	23° 30' 10.8"	162	732	79	4.50	2.07	HII	HII
NGC 6240	16 ^h 52 ^m 58.5 ^s	02° 24' 03.4"	229	758	107	3.30	2.14	HII	HII
IRAS 17208-0014 [†]	17 ^h 23 ^m 21.9 ^s	-00° 17' 00.4"	127	248	60	1.96	2.11	PDR	-
IRAS 19254-7245 [†]	19 ^h 31 ^m 21.3 ^s	-72° 39' 11.9"	111	264	84	2.37	1.33	AGN*	-
IRAS 20551-4250 [†]	20 ^h 58 ^m 26.8 ^s	-42° 39' 00.6"	123	425	62	3.47	1.99	HII	-
IRAS 23128-5919	23 ^h 15 ^m 47.0 ^s	-59° 03' 11.4"	90	319	53	3.54	1.70	HII	HII
NGC 253(Disk)	00 ^h 47 ^m 33.1 ^s	-25° 17' 17.8"	339	681	171	2.00	1.98	PDR	PDR
NGC 520	01 ^h 24 ^m 34.8 ^s	03° 47' 30.8"	486	511	231	1.05	2.10	PDR	PDR
NGC 1068(Disk)	02 ^h 42 ^m 40.6 ^s	-00° 00' 47.8"	246	296	137	1.20	1.80	PDR	PDR
NGC 1808(Disk)	05 ^h 07 ^m 42.3 ^s	-37° 30' 46.1"	1073	1450	538	1.35	2.69	PDR	PDR
M82(Disk)	09 ^h 55 ^m 52.2 ^s	69° 40' 46.9"	1177	1133	589	0.96	2.00	PDR	PDR
NGC 3147 [†]	10 ^h 16 ^m 53.6 ^s	73° 24' 03.3"	375	483	215	1.29	1.74	PDR	-
NGC 3256(Disk)	10 ^h 27 ^m 51.8 ^s	-43° 54' 08.7"	202	420	85	2.07	2.38	PDR	PDR
NGC 3263(Nuc : 4.5 ") [†]	10 ^h 29 ^m 13.1 ^s	-44° 07' 22.0"	59	62	31	1.03	1.94	PDR	-
NGC 4676(A) [†]	12 ^h 46 ^m 10.1 ^s	30° 43' 57.2"	58	30	40	0.53	1.44	PDR	-
NGC 4676(B) [†]	12 ^h 46 ^m 11.4 ^s	30° 43' 23.1"	4.11	2.15	2.17	0.52	1.89	PDR	-
Centaurus A(Disk)	13 ^h 25 ^m 27.6 ^s	-43° 01' 08.8"	62	101	35	1.62	1.78	PDR	PDR
NGC 6814 [†]	19 ^h 42 ^m 40.6 ^s	-10° 19' 24.6"	291	290	144	1.00	2.02	PDR	-
NGC 7252	22 ^h 20 ^m 44.9 ^s	-24° 40' 41.3"	142	185	67	1.30	2.11	PDR	-

Table note: Our galaxy sample is presented in three parts. The top includes nuclei of galaxies containing an AGN, the middle contains regions harboring starburst activity and the bottom presents quiescent star forming regions. The spectral type column indicates which of the three components (HII, PDR or AGN) provides the dominant contribution. Two values, one according to our broad band diagnostic (left column, see also Fig. 6) and one based on the CVF diagnostic (right column, see also Fig.8) are presented. As it can be seen from the figures mentioned above some sources fall outside the limits of our diagnostic, and they are classified to their nearest mid-infrared spectral type. The broad band fluxes for most galaxies have been calculated from their CVF spectra. Galaxies marked with [†] have been observed only in broad band filter mode (LW). NGC 7252 was observed in the CVF mode but due to its weak continuum emission the errors of the CVF diagnostic are large so we include only the LW classification which classifies the galaxy as PDR dominated. Notation used : "Nuc"= nucleus with the diameter in arcsec, "Disk"= well detected star formation region in the disk. The identification of specific regions in Arp 299, NGC 4038 and NGC 4676 follows the usual notation found in the literature. In NGC 4676(A), the MIR spectral energy distribution is probably contaminated by stellar emission (Hibbard & van Gorkom 1996, Read & Ponman 1998). This classification leads us to consider two new candidates with a dominant AGN contribution (marked by *: the interacting system IRAS 19254-7245 and the nucleus of Arp 236)

3.1. MIR emission of "normal" galaxies: early to late type

The MIR spectrum of elliptical galaxies, usually poor in cold gas and dust, is produced primarily by their

evolved stellar population, and can be shown to resemble a blackbody continuum with temperatures ranging from

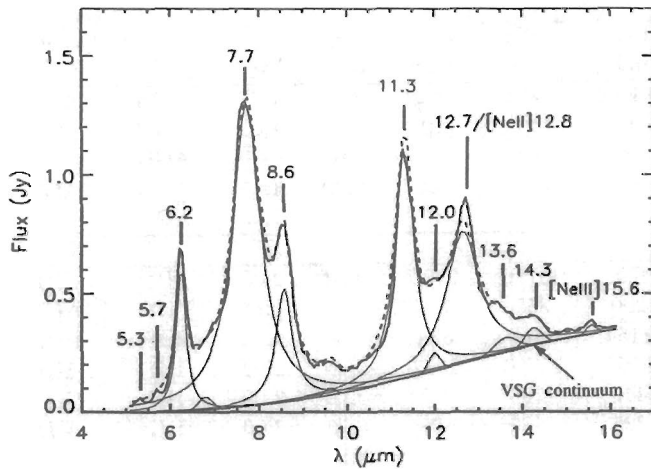


Fig. 1. Typical spectrum of a quiescent star forming region. The MIR spectrum (5-16 μm) of a disk region of M82 away from the central starburst (thick solid line), chosen for its high signal to noise ratio, is compared to a modeled spectrum (dashed line) including a continuum and UIBs. The dust continuum due to VSGs is modeled by a black-body curve ($T=200$ K) reddened by a dust absorption law with $A_V=6$ mag (Dudley & Wynn-Williams 1997). The UIBs marked with the rest wavelength of their peak emission are modeled by lorentzian profiles (thin solid lines) (cf. Boulanger et al. 1998). Note the faint [NeIII] emission and the probable contamination of the [NeII] 12.8 μm line with the 12.7 μm UIB feature. Faint UIBs are also detected at 5.3, 5.7, 12, 13.6, and 14.3 μm as in many other galaxies of our sample.

4000 to 6000K (Madden et al. 1997, Boselli et al. 1998, Madden et al. 1999). This stellar emission accounts for most of the MIR emission of some elliptical galaxies. However, a non-negligible fraction of elliptical galaxies shows emission from UIBs and hot dust (Knapp et al. 1996a, Knapp et al. 1996b, Madden et al. 1999), as well as emission from non-thermal sources.

The MIR spectrum of spiral galaxies, rich in gas and dust, is largely dominated by dust emission and in galactic disks is mainly attributed to the UIB emission. The observed UIB features show little spectral variation, and the total broad band LW3(12-18 μm)/LW2(5-8.5 μm) flux ratio is close to 1 (Boselli et al. 1998, Roussel et al. 1999a, Roussel et al. 1999b). This ratio has been proposed as an indicator of the fraction of the VSG continuum to the UIB feature emission. As an example of the "typical" integrated MIR emission of normal spiral galaxies, we present in Figure 1 the spectrum of a region in the disk of M82, 45 arcsec away from the central starburst. The usual UIB features fitted by lorentzian profiles are prominent. In addition, we can notice the presence of several faint UIBs at 5.3, 5.7, 12, 13.6, 14.3 μm (Verstraete et al. 1996, Beintema et al. 1996, Sloan et al. 1999). Similar MIR spectra are also found in regions of the Galactic disk (Cesarsky D. et al. 1996a, Boulanger et al. 1996).

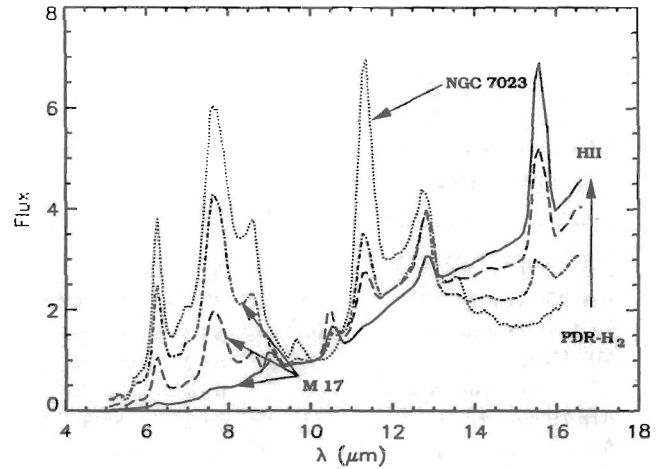


Fig. 2. MIR spectra showing the variation of the SED from a naked HII region, depicted by a solid line (close to OB stars in M17, Cesarsky D. et al. 1996b), to an isolated PDR indicated by a dotted line (NGC 7023 Cesarsky D. et al. 1996a). Each spectrum was normalized to the continuum at 10 μm . The evolution is indicated by the vertical arrow which shows how the spectrum changes as we move from the outskirts of the HII region (dotted line) towards its core and near the OB stars (dashed and solid lines). Note how the strength of the UIBs progressively diminishes and how the continuum emission increases.

3.2. MIR emission of starburst galaxies.

The MIR spectra of galaxies with evidence of a starburst and/or the presence of an AGN have distinct features compared to normal spiral galaxies. Their most prominent characteristic is the presence of a very steeply rising continuum at 12-16 μm from VSGs. In starburst regions, this continuum is primarily produced in HII regions, tracing regions of massive star formation activity. The hard radiation field from young stars also excites ionic lines from [ArII], [ArIII], [SIV], [NeII] and [NeIII] which can be seen in the MIR spectra of starbursts. We display the form of this continuum in Figure 2 (solid line) using the spectrum near a naked HII region observed in M17, where the MIR emission is almost completely dominated by the VSG continuum (Cesarsky D. et al. 1996a). The weak intensity of UIBs is interpreted as a consequence of the destruction of their carriers. However, since UIBs originate from diffuse as well as photodissociation regions which surround the HII regions (Verstraete et al. 1996, Mattila et al. 1996, Tran 1998), strong UIBs can be detected in the MIR spectrum of embedded starburst regions. One can also see that the peak of the UIB emission is found in the PDRs outside the strong radiation field of the HII region (Cesarsky D. et al. 1996b). Consequently, this depletion of the UIB carriers will further enhance to the observed relative increase of the MIR continuum in starburst regions (see spectrum of Knot A in

the Antennae Galaxies, Mirabel et al. 1998). Therefore, the LW3(12-18 μ m) to LW2(5-8.5 μ m) flux ratio increases in strong starburst environments. One should note that the overall MIR spectral shape can be also considerably affected by the high extinction often found in starburst regions. In particular the silicate band centered at 9.7 μ m can suppress the strength of UIBs at 11.3, 8.6 and 6.2 μ m relative to the one at 7.7 μ m (Lutz et al. 1998) as seen in the spectrum of Arp 220 (Charmandaris et al. 1997).

3.3. MIR emission of AGNs.

Several studies have already shown that MIR spectra near AGNs also present weak UIBs (Roche et al. 1991, Genzel et al. 1998a, Schulz et al. 1998, Dudley 1999). We display this in Figure 3, where we present a CVF spectrum of the nearest AGN of our sample located in the radio galaxy Centaurus A (CenA, NGC 5128, Mirabel et al. 1999).

In the MIR observations of CenA, we have sufficient spatial resolution and we can disentangle the emission of the central regions near the AGN from that due to star forming regions of the galactic disk. The absence of UIBs in the central 5 arcsec (~ 100 pc) possibly indicates the destruction of their carriers by the intense UV-X radiation field from the AGN (Léger et al. 1989, Allain et al. 1996). Moreover, there is a noticeable continuum at short wavelengths [3-9 μ m] commonly attributed to hot dust, associated with the torus of molecular gas proposed in the unified model (Pier & Krolik 1992, Granato et al. 1997). The alternative interpretation of supernova remnants (SNRs) as the physical mechanism explaining the AGN phenomenon (Terlevich et al. 1992) is not supported by the MIR observations. Nearby SNRs, such as Cassiopeia A, Kepler, the Crab, RCW 103 and IC443 are all characterized by strong ionic and/or molecular line emission and a faint continuum (Douvion et al. 1999, Oliva et al. 1999). These characteristic features are not found in our integrated MIR spectra of galactic nuclei which are known to harbor AGNs. The MIR spectrum of AGNs is flatter compared to that of naked HII regions (see the AGN and HII spectra in Figure 5). This is in agreement with IRAS observations where infrared spectra from active galaxies are generally significantly flatter with the peak of emission shifted towards the MIR (de Grijs et al. 1985). Near an AGN the radiation field can heat dust up to evaporation temperatures of ~ 1000 K for silicate and ~ 1500 K for graphite. As a result, the dust continuum emission becomes prominent at short wavelengths (3-6 μ m) in contrast to emission from star forming regions which appears at longer wavelengths (e.g. Barvainis 1987). Such a continuum is found in the center of all galaxies in our sample known to be hosting an AGN such as NGC 1068, NGC 6814 or NGC 3147 (Laurent et al. 1997). Highly ionized species tracing the hard radiation field of the AGNs (e.g. [NeV]14.3 μ m and [NeVI]7.6 μ m) are detected in

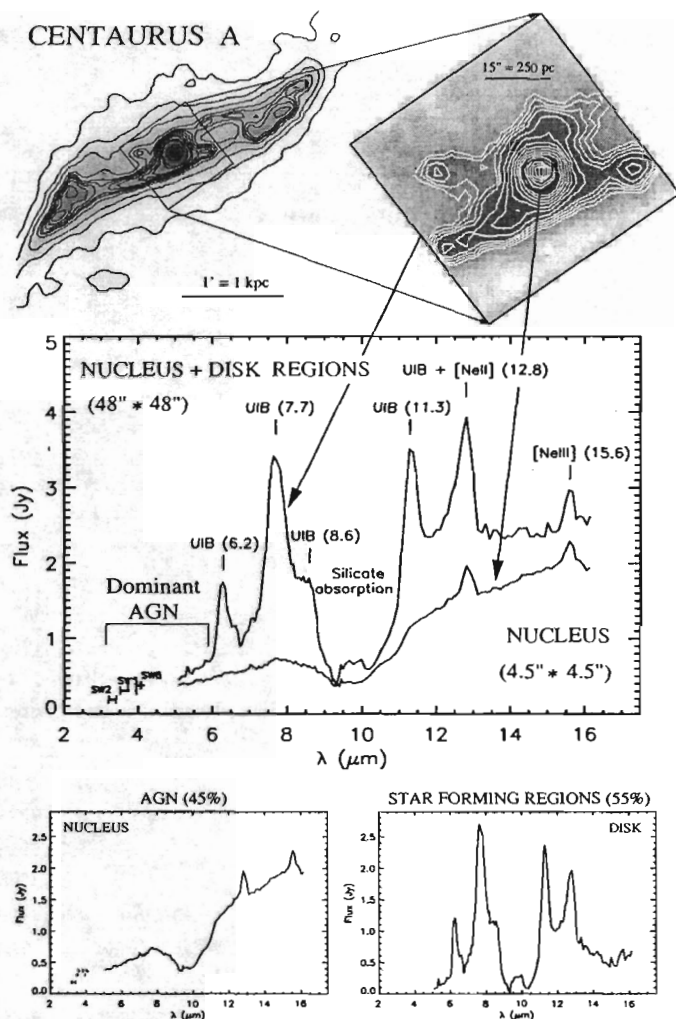


Fig. 3. Upper left panel: A 7 μ m map of the dust emission in Cen A (from Mirabel et al. 1999). Upper right panel: The central region of Cen A as seen in the band 7-8.5 μ m which traces the most intense UIB emission at 7.7 μ m. Due to a good spatial resolution at 7 μ m (FWHM = 5 arcsec, i.e. 100 pc at 3.5 Mpc), we can separate the nuclear region from the disk. Middle panel: The lower curve represents the MIR spectrum originating only from the nuclear region (100 pc in diameter) whereas the upper curve shows the spectrum integrated over a larger region (800 pc in diameter) which includes both disk structures and the nucleus. The silicate absorption cannot be well estimated from the global spectrum but is clearly detected in the AGN continuum. Lower panel: The AGN spectrum (left) represents 45 % of the energy between 5 and 16 μ m and it contributes more than 90 % at wavelengths between 3 and 6 μ m. No emission associated with star forming regions is detected between 3-4 μ m (lower right panel, ISOCAM SW channel). While UIBs dominate the MIR emission of the disk, they are almost absent in a region of 50 pc radius around the AGN. The higher [NeIII]/[NeII] ratio detected in the AGN (lower left panel) further indicates the presence of a hard radiation field.

NGC 1068. However, due to the low spectral resolution of

ISOCAM spectra ($\lambda/\Delta\lambda \sim 40$), we are unable to resolve them from the nearby UIBs in most of our galaxies.

4. MIR diagnostics to distinguish AGNs, starburst and quiescent star forming regions.

Our diagnostics are based on the assumption that the integrated MIR emission in galaxies can be represented by a sum of contributions originating from (1) regions where the dust is dominantly heated by an AGN and (2) regions where star formation is the main source of energy. As mentioned in sections 3.1 and 3.2, star forming regions can also be divided in two classes: relatively quiescent regions where most of the MIR emission originates from the PDRs, and starburst like region where continuum emission at $15\mu\text{m}$ produced in the HII regions is dominant. We therefore propose to categorize the spectra from our sample using three templates namely for AGNs, naked HII regions and isolated PDRs. The relative proportions of these templates required to reproduce a given MIR spectrum will allow the classification of the observed region as AGN, starburst or relatively quiescent region.

4.1. MIR templates

To construct the templates of each component, we selected three ISOCAM CVF spectra dominated by each of these physical processes. These template spectra are presented in Figure 5a.

The strong continuum at $14\text{--}15\mu\text{m}$ observed in starburst galaxies was modeled by a typical naked HII region spectrum from M17 (Cesarsky D. et al. 1996a). We note several ionic emission lines [ArIII]($8.9\mu\text{m}$), [SIV]($10.5\mu\text{m}$), [NeII]($12.8\mu\text{m}$) and [NeIII]($15.6\mu\text{m}$), while UIBs are absent or faint (see the upper part of the Figure 5a). A typical starburst spectrum can be usually decomposed using the VSG continuum with some UIB emission (Tran 1998). Since UIBs originate mainly from PDRs or diffuse regions, we used as their template, an isolated PDR spectrum from the reflection nebula NGC 7023 (Cesarsky D. et al. 1996a) (see the lower right part of the Figure 5a).

The AGN component is described with the MIR spectrum of the central region of CenA (see Fig. 3 and the lower left part of the Figure 5a). The UIBs are absent as in the HII region template. However, in contrast to the HII region template spectrum, the continuum at short wavelengths ($5\text{--}9\mu\text{m}$) is prominent in the AGN spectrum. In addition, the equivalent width of emission lines of [NeII] and [NeIII] is small and may also be attributed to the overwhelming continuum contribution at all wavelengths between 3 and $16\mu\text{m}$. We should note that the extinction does affect the AGN template and is higher in Cen A than in NGC 1068 (see Fig. 10 in the discussion).

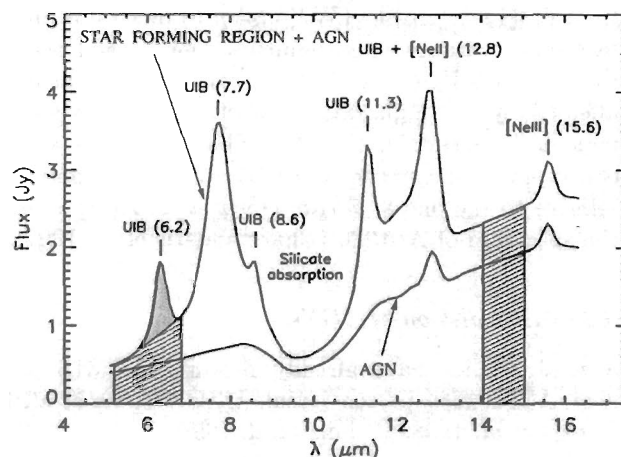


Fig. 4. The relative strength of the UIB($6.2\mu\text{m}$) feature is estimated by dividing the spectrum between 5.1 and $6.8\mu\text{m}$ in two different parts. One is the integrated flux above the line between 5.9 and $6.8\mu\text{m}$ which is attributed to the UIB at $6.2\mu\text{m}$ and traces essentially the PDRs in the star forming regions. The second is the integrated flux under the line which is mainly attributed to the AGN continuum and/or wing of the UIB at $7.7\mu\text{m}$. The feature to continuum indicator is used to estimate the relative contributions to the heating of the dust from quiescent star forming regions compared to the one from an AGN. We measure the “hot continuum” [$5.1\text{--}6.8\mu\text{m}$] which may contain an AGN contribution and compare it to the “warm continuum” [$14\text{--}15\mu\text{m}$] produced by both star forming regions and AGNs. As a consequence the warm to hot continuum ratio can be used to quantify the relative contribution of a starburst continuum and an AGN in the MIR.

4.2. MIR indicators: $[HII]/[AGN]$ and $[PDR]/[AGN, HII]$

As each MIR template has distinct characteristics, we can quantify their relative contribution to the integrated spectrum. We have used two indicators based on the UIB strength and the MIR continuum. As indicator of the relative HII and AGN contribution, we use the ratio of “warm” [$14\text{--}15\mu\text{m}$] to “hot” [$5.1\text{--}6.8\mu\text{m}$] continuum. The regions of the MIR spectrum used for our method are presented in Figure 4. As the above mentioned ratio decreases, the presence of an AGN becomes more evident due to the increase of the relative importance of the “hot” continuum. The UIB($6.2\mu\text{m}$) to continuum [$5.1\text{--}6.8\mu\text{m}$] flux ratio can be used to identify the relative contributions of the quiescent star forming regions to the starburst and/or AGN MIR emission. This indicator is very similar to the one proposed by Genzel which is based on the strength of the $7.7\mu\text{m}$ feature (Genzel et al. 1998a, Lutz et al. 1998). Even though the UIB at $6.2\mu\text{m}$ is weaker than the $7.7\mu\text{m}$ feature, it is very well detected in all of our spectra (see the spectra in the Antennae in Mirabel et al. 1998, Figures 3 and 7 for some examples). Moreover, our estimate of the UIB to continuum ratio is less affected by the strong extinction due to silicate at $9\text{--}11\mu\text{m}$ and the continuum

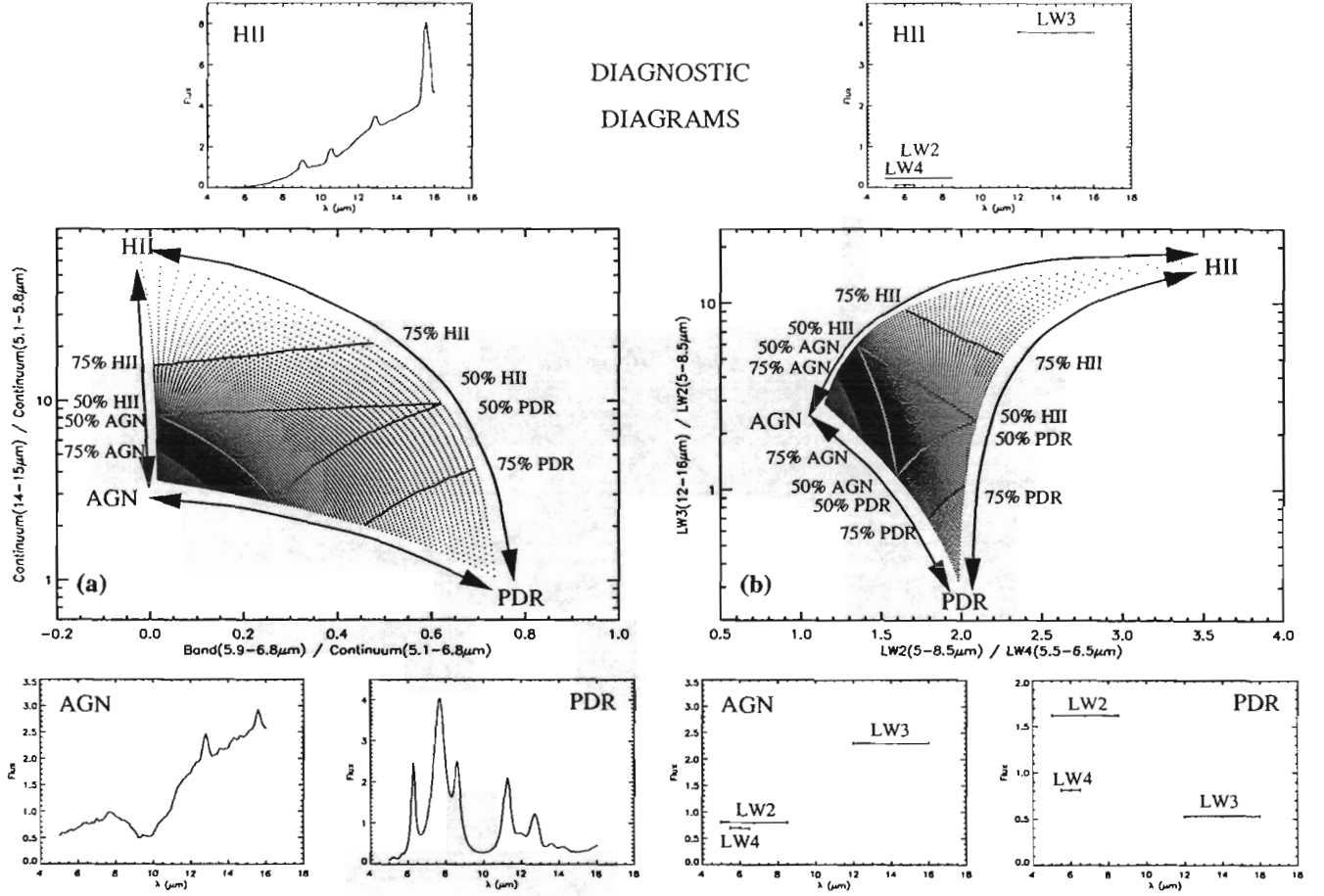


Fig. 5. a) Diagnostic diagram based on CVF spectra. b) Diagnostic diagram based on broad band filters. Three distinct areas can be defined. In the upper corner, we select spectra dominated by massive HII regions such as those found in starbursts. On the lower left, AGN spectra are dominant in a very small region, and finally, PDR spectra fall in the lower right part. The solid lines and the associated percentages indicate a constant fraction of one component along each line (see section 4.3).

at $5-7\mu\text{m}$ is less contaminated by the VSG continuum. In addition, the effect of a strong absorption on the AGN continuum can mimic the presence of a UIB at $7.7\mu\text{m}$ but not at $6.2\mu\text{m}$. As our primary goal is to detect the absence of UIBs as well as the presence of the AGN continuum, a criterion based on the $\text{UIB}[5.9-6.8\mu\text{m}]/\text{Continuum}[5.1-6.8\mu\text{m}]$ ratio applied on high signal to noise spectra gives a more accurate diagnostic in revealing the presence of an AGN. As we show in the following sections, the relative variation of our $\text{UIB}/\text{Continuum}$ at $6\mu\text{m}$ is reliable in separating a featureless continuum from UIB spectra even if our $6\mu\text{m}$ continuum measurements may still be slightly affected by emission coming from the wing of the $7.7\mu\text{m}$ UIB (see Fig. 4).

4.3. Diagnostic diagram

Having defined the three MIR templates, we construct a complete library of composite spectra where the contribution of each template can vary between 0 and 100%. On

these composite spectra, we can measure the diagnostics presented above and plot them on a 2-dimensional diagram (see Fig. 5): Three main regions can be identified in the corners of this diagram where the signatures of AGNs, starburst, or quiescent star forming regions dominate the total spectrum.

The above diagram can be applied only in the galaxies where a full mid-IR spectrum is available. However, one can expand it to cases where only broad band mid-IR images are available. This can be done by using our library of spectra to estimate their corresponding fluxes through the ISOCAM filters that isolate as closely as possible the regions identified in Figure 4. The filters used are the LW2($5-8.5\mu\text{m}$), LW3($12-18\mu\text{m}$) and LW4($5.5-6.5\mu\text{m}$). As we will show in the following sections the broad band diagnostic gives results comparable to those obtained with the CVFs. The equivalent fluxes of our CVF templates through the 3 broad band filters are presented in Figure 5b. Using the same reasoning as in Figure 5a, we estimate the relative strength of UIBs with

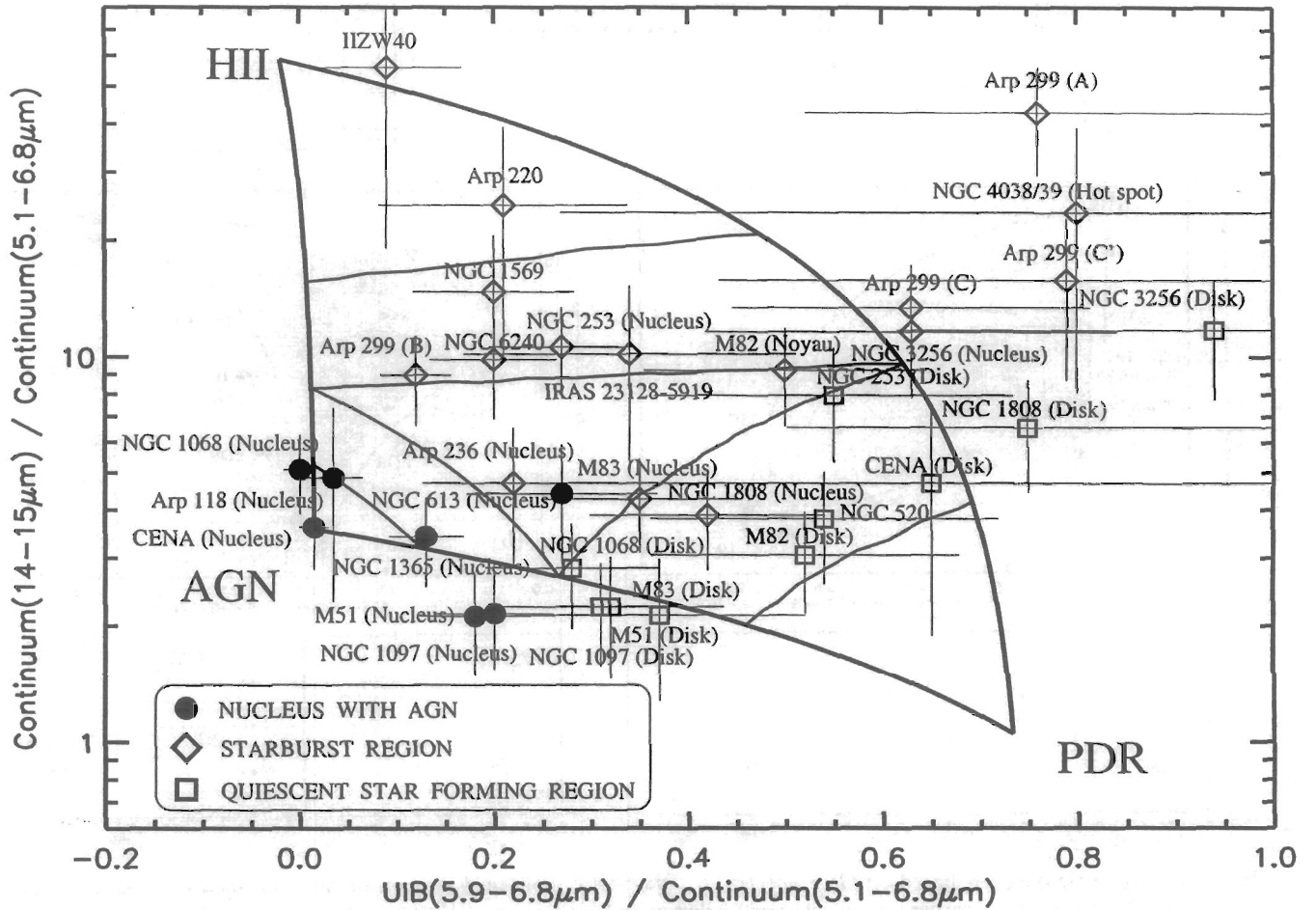


Fig. 6. Diagram based on CVD diagnostics for 33 spectra using the notation of Table 1. The error bars are estimated from the rms map at 1σ for each wavelength along the CVD spectra added to a systematic error of 10% due to the transient correction method. Note that several spiral and blue compact dwarf galaxies included in this figure are not listed in the Table 1 since they belong to other samples (Madden et al. 1999, Roussel et al. 1999a). The circles mainly located in the bottom left part of the diagram represent the central regions known to contain an AGN. The galaxies hosting starburst activity are in the upper part and are marked with diamonds. The spectra of quiescent star forming regions found lie close to the PDR region and they are denoted with squares. The curves demarcate the AGN, PDR and HII spectral type according to Figure 5a.

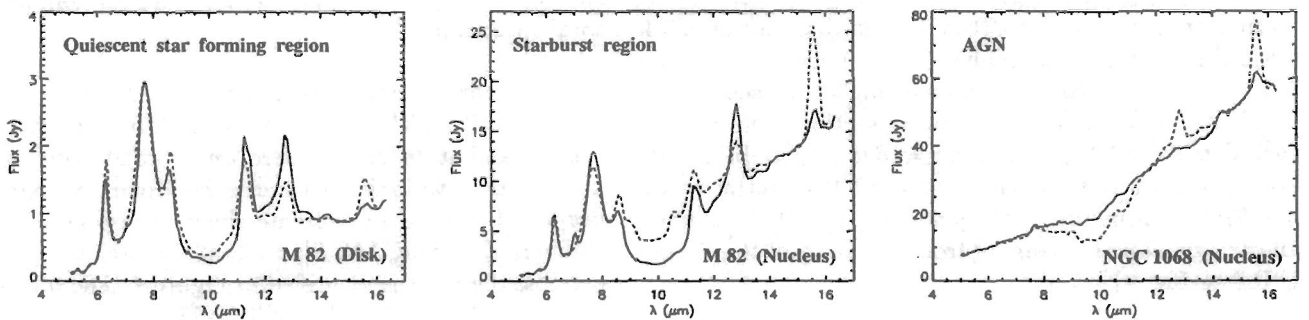


Fig. 7. Examples of spectra (solid lines) classified as dominated by star forming regions (the disk and the nucleus of M82) and by an AGN (the nucleus of NGC 1068) are shown with their corresponding model based on templates (dashed line). For each spectrum, we find the appropriate combination of templates (8%AGN, 50%HII, 42%PDR for the nucleus of M82; 8%AGN, 15%HII, 77%PDR for the disk of M82 and 77%AGN, 23%HII, 0%PDR for the nucleus of NGC 1068) using the location of those sources in the CVD diagram. Each composite spectrum has been normalized at 14-15 μm .

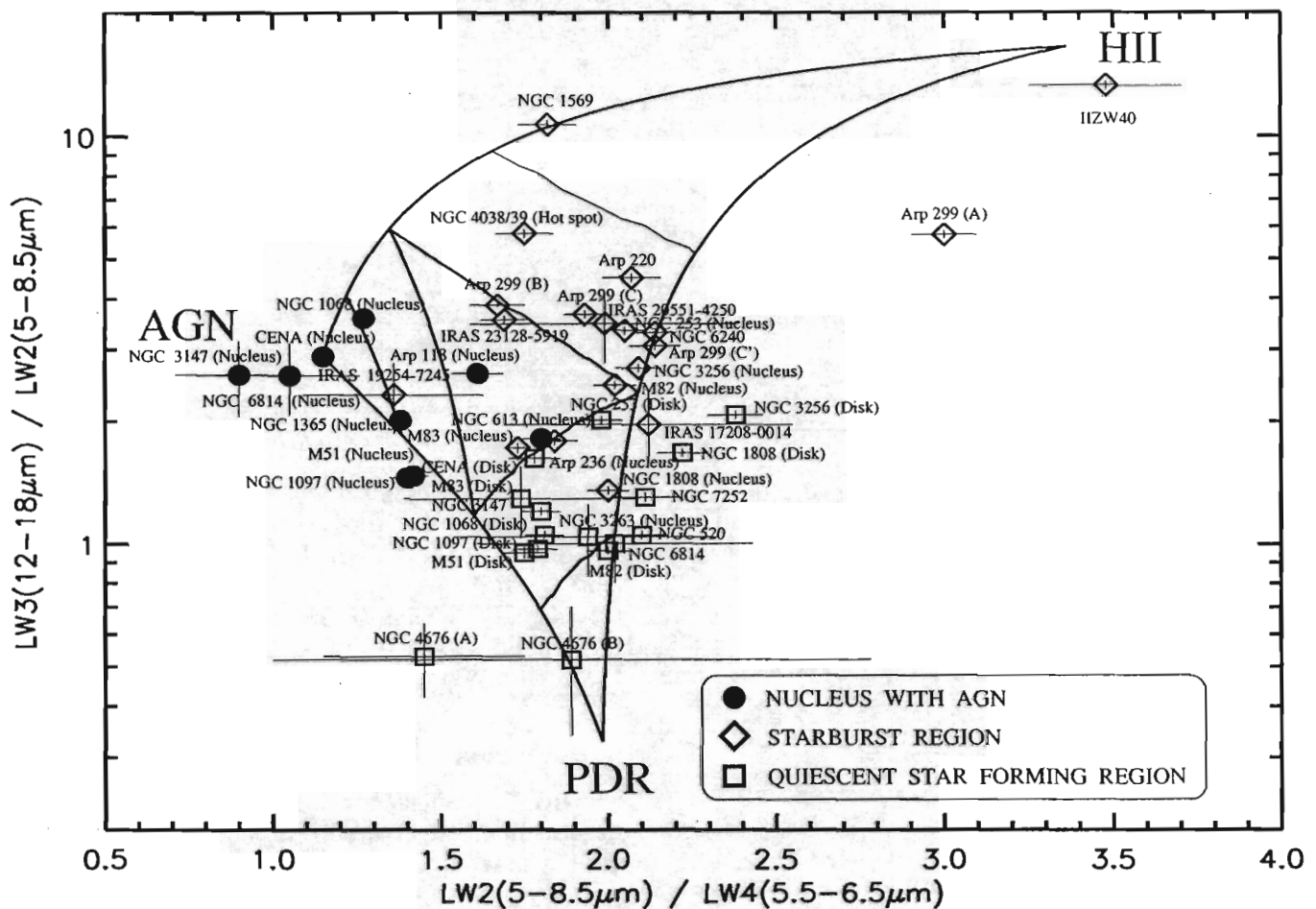


Fig. 8. Diagram based on broad band diagnostics for 45 spectra using the notation of Table 1. The error bars are estimated from the rms map at 1σ for CVF spectra or broad band observations added to a systematic error of 10% due to the transient correction method. Note that several spiral and blue compact dwarf galaxies not listed in the Table 1 are from other samples (Roussel et al. 1999a, Madden et al. 1999). The galactic central regions (size of several kpc) hosting an AGN are all located in the left part of the diagram (marked with circles). The galaxies dominated by a starburst activity are in the upper part due to their higher LW3/LW2 ratio (marked with diamonds). The spectra of quiescent star forming regions lie close to the PDR area (marked with squares). The curves demarcate the AGN, PDR and HII spectral type according to Figure 5b.

the LW2(5-8.5 μ m)/LW4(5.5-6.5 μ m) flux ratio while the ratio of the LW3(12-18 μ m)/LW2(5-8.5 μ m) emission provides an estimate of the VSG contribution relative to the UIB and/or hot dust emission at short wavelengths. Those two diagnostic diagrams have in common the capacity to separate individually regions dominated by AGN, quiescent star forming regions or starburst regions. To judge the robustness of those two criteria, we make a comparison in the following section between the area covered by real galaxy observations and our library of composite spectra.

4.4. Application of the diagnostic

The previous MIR indicators were applied to the galaxies of our sample (see Table 1), in which we also included a few irregular galaxies such as the blue compact dwarf galaxies IIZw40 and NGC 1569 (Madden et al. 1999) and barred spiral galaxies (Roussel et al. 1999a) in order to cover the diagram completely. In cases where we had adequate spatial resolution, we extracted different physical regions in the same galaxy. The results are presented in Figure 6. Galaxies previously classified as starbursts, such as Arp 220 and Arp 299(A), fall toward the top part of the diagram implying a large fraction of starburst regions compared to quiescent star forming regions. A few nearby galaxies with known AGNs are located in the bottom left part of the diagram with the nucleus of Cen A (our AGN

template) at the corner. Regions of moderate star formation observed in galactic disks are situated in the region of the diagram where we expect to find a dominant PDR contribution. In Figure 7, we present three typical spectra from our sample dominated by an AGN (the nucleus of NGC 1068), an HII continuum (the nucleus of M82) as well as UIBs (the disk of M82). Based on their position on our diagnostic diagram in Figure 6, we estimate the corresponding fraction of MIR templates as expressed in Figure 5a. This is a first order approximation since we do not take into account the silicate absorption between 9 and 11 μm on our template spectra. Indeed, the difference at 9 and 11 μm is probably due to the strong silicate extinction in embedded starbursts or AGNs. We do not attempt to model the strong emission of the [NeII](12.8 μm) and [NeIII](15.6 μm) which are independent of the overall dust emission properties. Nevertheless, the agreement presented in Figure 7 is sufficient for modeling the general shape of spectra.

For comparison, we present in Figure 8 the diagnostic diagram using broad band filters². As expected, the AGN candidates appear in the left part of this diagram. For LW3/LW2 ratios close to 1, PDRs dominate the MIR emission in our sample as it was the case for normal spiral galaxies (Boselli et al. 1997, Roussel et al. 1999a). For LW3/LW2 ratios between 1 and 6, both an AGN and a star forming region signature may appear in our spectra. Indeed, as one can see from Figure 8 unless the LW3/LW2 ratio is greater than 6, one cannot use it alone to exclude the presence of an AGN in a starburst spectrum (e.g. the nucleus of NGC 253 or NGC 1068). Although this diagram uses only three broad band filters, the MIR classification is in good agreement with results given by the diagnostic diagram based on full spectra (see Table 1).

We note, however, that the LW2/LW4 flux ratio is well adapted to estimate the presence of an AGN contribution. For LW2/LW4 ratios lower than 1.5, we clearly see that the MIR emission is dominated by the AGN whose strong continuum and nearly absent UIBs, contribute to decrease this ratio. For larger LW2/LW4 ratios, emission is dominated either by quiescent star forming regions or by starburst regions (see Fig. 8). Applying this criterion we clearly see that the nucleus of M82 is classified as a starburst while the nucleus of NGC 1068 has a typical AGN signature.

Moreover, the diagnostic diagrams of Figures 6 and 8 suggest that the well-known ultra-luminous galaxies such as IRAS 23128-5919 and NGC 6240 have MIR spectra which are overwhelmed by a strong starburst signature. In the "Super Antennae" (IRAS 19254-7245), which

harbors a Seyfert 2 nucleus (Mirabel et al. 1991), more than $\sim 70\%$ of its MIR flux originates from the AGN (Laurent et al. 2000).

One can also use this technique to discover up to now unclassified AGN hidden by a large column density of dust. Such a candidate is Arp 236 (IC 1623, VV 114), an infrared luminous system ($L_{\text{IR}} = 10^{11.62} L_{\odot}$), classified as an early-stage gas-rich merger ($M(\text{H}_2) = 5.1 \times 10^{10} M_{\odot}$, Yun et al. 1994), and composed of several nuclei and/or compact starburst regions. Previous near-infrared and radio studies showed no evidence for an AGN (Doyon et al. 1995, Knop et al. 1994). However, the MIR signatures of the eastern region (knot A, Doyon et al. 1995) place it near the AGN locus in our CVF diagram and, therefore, may contain a non-negligible fraction of AGN contribution in its MIR spectrum. Knot A is the brightest source in the near-infrared. It is also redder and more compact than all other sources in the system (not resolved at 3.7 μm with a FWHM of 0.3 arcsec, Knop et al. 1994). We estimate that $\sim 40\%$ of the MIR emission in the region can originate from an optically obscured AGN. A MIR spectral classification based on our method, for all galaxies of our sample is presented in the last column of Table 1.

5. Discussion

Our diagnostic diagrams provide a new tool allowing us to identify an AGN or star formation (starburst and/or quiescent star forming regions) signature in the integrated MIR spectrum of a galaxy.

Although self consistent, our method is based on data from a rather diverse sample. To further test its validity, we compared it with the MIR diagnostics developed by Genzel et al. (1998a) on a complete sample of ULIRGs, using ISOPHOT-S. Using the published MIR spectra of the brightest sources in the Genzel/MPE sample we calculated the strength of the UIB at 6.2 μm in these spectra, as well as the equivalent LW2(5-8.5 μm)/LW4(5.5-6.5 μm) ratio since this is the principal discriminator between an AGN and star forming regions (see Fig. 9). The classification of galaxies obtained based on our method is in complete agreement with that of Genzel et al. (1998a). IRAS 23060+0505, IRAS 19254-7245, Mrk 273 and Mrk 231 are classified by both methods as galaxies containing a significant AGN contribution in MIR. In addition, in the wavelength range of ISOCAM (5-16 μm), we can better constrain the nature of the continuum at 7 μm between dust and stellar contribution using the 14-15 μm flux (LW3(12-18 μm)/LW2(5-8.5 μm) > 3 for the dust continuum and less than 0.3 for the stellar continuum). We are also able to distinguish whether a featureless continuum is due to an AGN or a neaked HII region (e.g. IIZw40).

Selective absorption by amorphous silicates, centered at 9.7 and 18 μm , can play a crucial role in obscuring emission over much of the MIR wavelengths. AGNs em-

² For galaxies of our sample for which we had only CVF spectra, we calculated the equivalent broad band filter fluxes taking into account their filter transmission. Note that since the CVF ends at 16 μm to match its equivalent LW3 filter to the ISOCAM standard LW3(12-18 μm) filter, we have normalized the transmission of the latter between 12 and 16 μm .

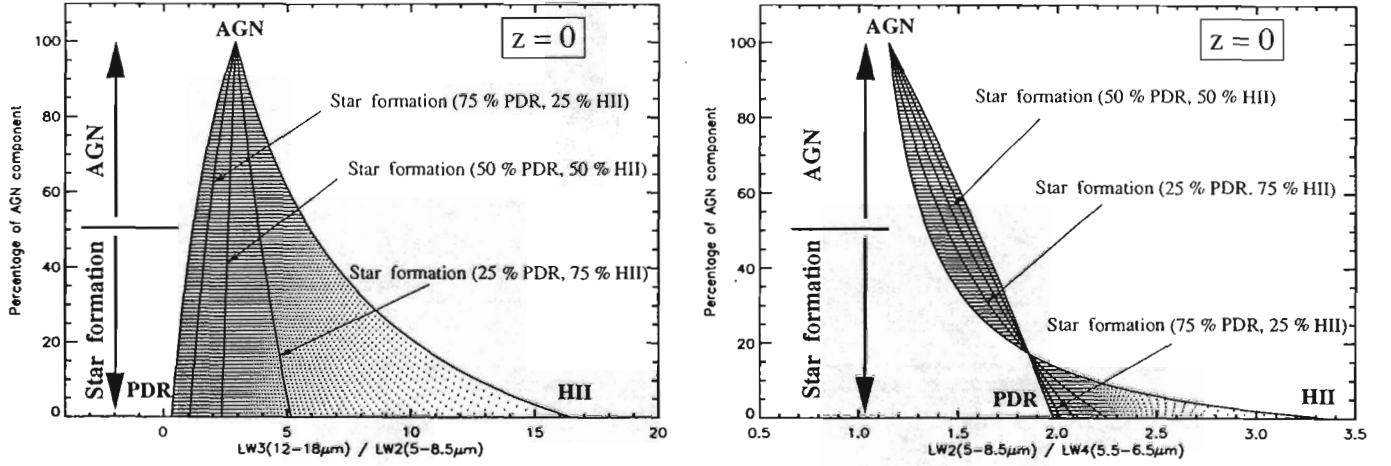


Fig. 9. Variation of the AGN-Starbust fraction as a function of $LW3(12-18\mu m)/LW2(5-8.5\mu m)$ on the left and $LW2(5-8.5\mu m)/LW4(5.5-6.5\mu m)$ on the right for galaxies of the local universe. Our library of composite spectra (see Fig. 5) can be divided into two components attributed either to AGN or star formation activity. The PDR/diffuse and HII regions are associated with star forming regions and their respective fraction in the star formation contribution is marked by solid lines. Note how the use of just the $LW3/LW2$ ratio is insufficient for detecting AGNs. This is not the case for the $LW2/LW4$ ratio which is relevant to select AGNs from starbursts (see section 4.4).

bedded in a large amount of dust could still remain undetected by our diagnostic. Studying a sample of Seyfert 1 (28 sources) and Seyfert 2 (29 sources) with ISOPHOT-S, Schulz et al. (1998) have already shown that the high absorption in Seyfert 2 galaxies blocks a large fraction (90% on the average) of the MIR continuum from the AGN inner torus. They do detect though, the silicate feature in emission at $9.7\mu m$ which is in favour of a moderately thick torus model ($A_V \sim 100$, Granato et al. 1997) and rules out models with very large optical depths ($A_V \sim 1000$, Pier & Krolik 1992). In our sample, among all nuclei (diameter $< 9''$) which are classified as AGNs based on our MIR diagnostics (see table 1), 5 nuclei are optically selected as Seyfert 2. Provided that sufficient spatial resolution is available, we can detect the hot dust continuum associated with the AGN and we are able to disentangle its contribution to the MIR emission of the galaxy. If those nuclei were observed with the ISOPHOT-S aperture of $24 \times 24 \text{ arcsec}^2$, we could detect the presence of an AGN only in the two nearest Seyfert 2 of our sample NGC 1068, CenA and in NGC 6814 which is a Seyfert 1. The dilution effect combined with the optical depth of the AGN torus would then lead us to underestimate the number of detected AGNs. The MIR continuum associated with AGNs is not completely suppressed behind the dusty torus and may be observed using sufficient spatial resolution ($\sim 5 \text{ arcsec}$) observations on nearby galaxies ($D < 50 \text{ Mpc}$ with $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, see Laurent et al. 1999). The detection of the AGN continuum in Seyfert 2 is in favor of a moderately thick torus model as proposed by Schulz et al. (1998) and modeled by Granato et al. (1997).

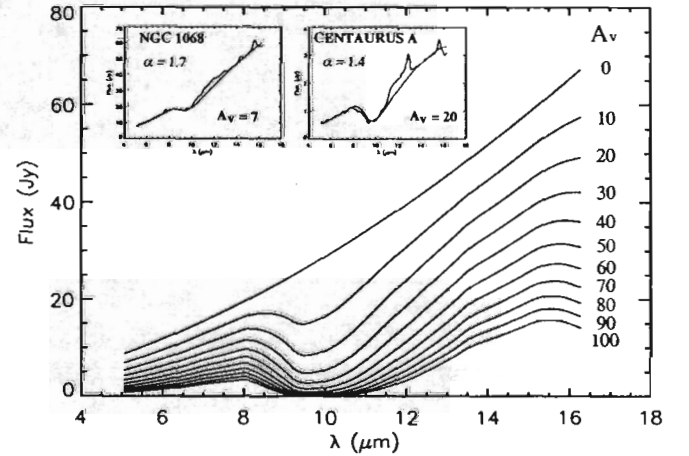


Fig. 10. The effects of absorption on AGN spectra characterized by a strong continuum at short wavelength associated with an absence of UIBs. In small inset panels, we display the nuclear spectra of NGC 1068 and CenA as well as a best fit based on a simple screen model (with the dust absorption law of Dudley & Wynn-WyWilliams 1997) applied to a power law of spectral index α . The corresponding visible absorptions for the fits are 7 and 20 mag respectively. The large diagram presents how the same power law spectrum ($\alpha=1.7$) affected when absorption ranges from $A_V=0$ to 100.

In Figure 10, we note that the increase of the absorption in an AGN spectrum leads to a decrease of the hot continuum used in our diagnostic. This further suggests that the "true" AGN fraction would be underestimated and our detections must be considered as a lower limit. An

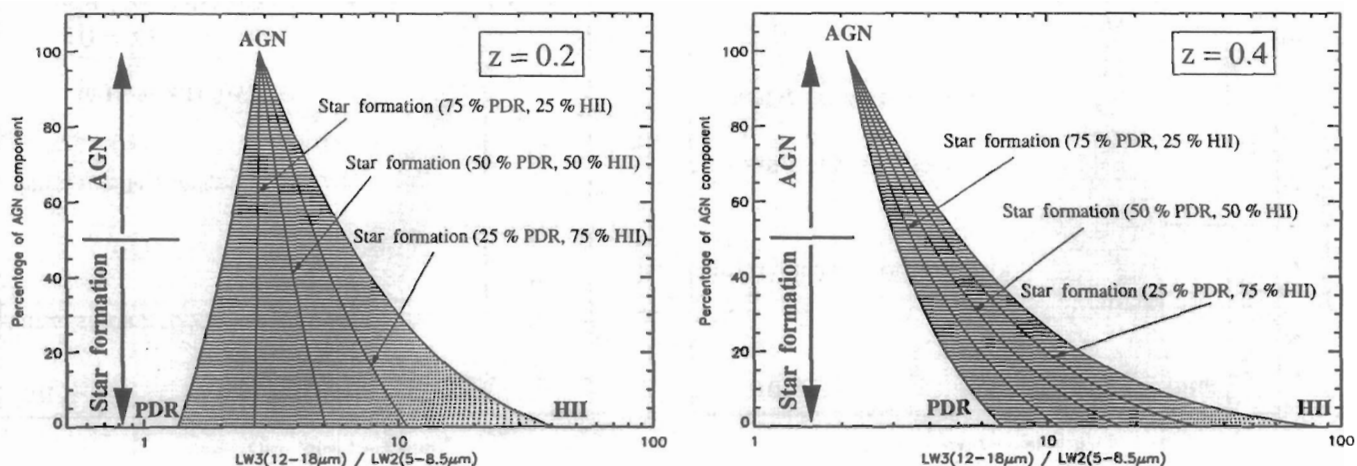


Fig. 11. Variation of the AGN-Starburst fraction at different redshifts ($z=0.2$ on the left and $z=0.4$ on the right) as a function of $LW3(12-18\ \mu\text{m})/LW2(5-8.5\ \mu\text{m})$. We use the same notation as in Figure 9 for the contribution of the star formation component. The percentages indicate the fraction of each contribution in the rest-frame wavelengths. The $LW3/LW2$ ratio which is degenerate for distinguishing AGNs from starbursts at low redshifts can be used for detecting the AGN continuum at higher redshifts ($z>0.4$) thanks to the K-correction effect on MIR spectra (see section 5).

intrinsically low AGN contribution to the MIR spectrum of a source would be difficult to be distinguished from the UIBs and VSG continuum at $6-7\ \mu\text{m}$. Consequently, we consider that an AGN is detected by our diagnostic when the estimated fraction of the AGN emission is larger than the contribution of starburst or quiescent star forming regions.

Recently several studies on the origin of the MIR emission in distant galaxies were performed with the ISOCAM deep field surveys (Aussel et al. 1999, Désert et al. 1999) using the LW3 and LW2 broad band filters. Our diagnostic implies that one cannot discriminate between an AGN and a starburst signature using just those two filters in the local universe (see Fig. 9). At high redshifts, the two filter bandpasses sample shorter rest frame wavelength emission and are less sensitive to the VSGs continuum. In Figure 11, we applied a redshift correction on our MIR templates at $z=0.2$ and $z=0.4$, and we obtained the equivalent diagnostic diagrams derived from observations of nearby galaxies. To extrapolate the part of the spectrum under $5\ \mu\text{m}$, we used a power law for the AGN template and a black-body continuum for the naked HII region template. We also assume that the PDR component under $5\ \mu\text{m}$ is negligible (Lu et al. 1999). At $z=0.4$, objects with $LW3/LW2 < 3$ are classified as dominated by an AGN in the MIR. For redshifts between 0.5 and 1, the LW3 filter samples mainly UIBs (LW2 at $z=0$), while LW2 probes the hot dust emission between 3 and $5\ \mu\text{m}$ (assuming that the stellar emission is negligible in spiral galaxies and only begins to be strong enough below $2\ \mu\text{m}$). Consequently, low values of the $LW3/LW2$ flux ratios in these surveys would suggest the presence of emission from an AGN.

In our diagnostic method, we have implicitly considered the MIR emission from the evolved stellar population is negligible in spiral galaxies. Even though this may be true for galactic disks (Roussel et al. 1999a), extra caution is needed for bulges in the center of which one finds the AGN. In that case it is the slope of the MIR spectrum which would reveal the presence of an AGN. Indeed, in AGN spectra, a rising continuum would directly rule out a possible contamination from evolved starlight. Moreover, the fact that the core radius of the bulge is several orders of magnitude larger than the region responsible for the "hot continuum" would in principle facilitate their separation in nearby galaxies. For distant galaxies where the integrated MIR spectra include the whole galactic bulge, it is very difficult to estimate the form of the continuum below $6\ \mu\text{m}$. M83, a well known starburst galaxy, presents such an example, since we detect considerable continuum emission at $5-6\ \mu\text{m}$ (see Fig. 6). This emission is clearly extended outside the unresolved nuclear region and can be interpreted as stellar emission from the stellar bar (cf. Elmegreen et al. 1998 and Sauvage priv. comm.)³. Furthermore, for distant galaxies the contribution of the star forming regions surrounding an AGN would progressively enter in the beam and dilute the AGN MIR signatures. A more detailed discussion on this issue is presented in Laurent et al. 1999.

³ To further develop our diagnostic for general cases including evolved stellar population, the K band flux at $2.2\ \mu\text{m}$ can be used to estimate the contribution of the stellar emission observed at short MIR wavelengths. A $LW2/K$ or $LW3/K$ flux ratio lower than 1 indicates a more important contribution from the stellar component.

Our diagnostic method can be further expanded with the improved performance of upcoming telescopes, and can be used as a guide in scheduling future research programs. In particular, the higher sensitivity of SIRTf in the 5-40 μm range would permit a better measurement of the continuum for distant faint sources and, calculating the depth of both silicate absorption bands at 9.7 and 18 μm , a more precise estimate for the absorption. An increase in spatial resolution would also permit a significant improvement in the AGN/Starburst diagnostics. Both the Very Large Telescope with ISAAC (1-5 μm) and VISIR (5-30 μm) and the Next Generation Space Telescope which will cover the MIR spectrum, will probe regions of ~ 10 pcs near the AGNs, decreasing significantly the effects of beam dilution.

6. Conclusions

Using our ISOCAM MIR observations we have obtained a new AGN/Starburst diagnostic based on the strength of the Unidentified Infrared Band at 6.2 μm and the MIR continuum. We conclude that:

1) In AGN spectra (even with a faint starburst contamination), a strong MIR continuum is present at short wavelengths between 3-9 μm . This continuum is attributed to hot dust grains directly heated by the central engine. Furthermore, the absence of Unidentified Infrared Bands suggests that their carriers can be destroyed by the strong UV-X ray radiation field.

2) Our MIR diagnostic diagrams can be used to unravel AGNs that are completely obscured at optical wavelengths. For example, Arp 236 which was classified as a starburst galaxy triggered by an interaction is likely to contain an AGN that contributes $\sim 40\%$ to the MIR flux.

3) The emission from ultraluminous infrared galaxies can be dominated either by a starburst (e.g. Arp 220) or an AGN (e.g. The Super Antennae, IRAS 19254-7245). Nevertheless, an AGN can remain partially hidden by the torus absorption even in the MIR which may lead to an underestimate of its contribution to the whole spectral energy distribution.

4) In the local universe, the LW3(12-18 μm)/LW2(5-8.5 μm) ratio alone cannot be used to distinguish AGNs from starbursts. However, for galaxies at $z=0.4-1$, this ratio is effective in discriminating the AGN from the starburst contribution.

5) Applications of adapted versions of our diagnostic in future instruments such as SIRTf and NGST, which will sample the MIR band with higher spatial resolution and sensitivity than ISOCAM, should provide better insights into the heating sources of the interstellar medium in galaxies.

Acknowledgements. We thank H. Roussel, D. Tran and T. Douvion for providing data in advance of publication as well as P.-A. Duc and D.B. Sanders for their help on various aspects of this work. We are grateful to C. Dudley for sending us his

extinction curve. VC would like to acknowledge the financial support from a Marie Curie fellowship (TMR grant ERBFMBICT960967).

References

- Abergel A., Bernard J.P., Boulanger F., et al., 1996, A&A 315, L329
- Allamandola L.J., Tielens A.G.G.M., Barker J.R., 1985, ApJ 290, L25
- Allain T., Leach S. Sedlmayr E., 1996, A&A 305, 602
- Aussel H., Cesarsky C.J., Elbaz D., Starck J.L., 1998, A&A 342, 313
- Barvainis R. 1987, ApJ 320, 537
- Beintema D.A., van den Ancker M.E., Molster F.J. 1996, A&A 315, L369
- Boselli A., Lequeux J., Contursi A., et al., 1997, A&A 324, L13
- Boselli A., Lequeux J., Sauvage M., et al., 1998, A&A 335, 53
- Boulanger F., Boissel P., Cesarsky D., Ryter C., 1998, A&A 339, 194
- Boulanger F., Reach W.T., Abergel A., et al., 1996, A&A 315, L329
- Cesarsky C., Abergel A., Agnese P., et al., 1996, A&A 315, L32
- Cesarsky D., Lequeux J., Abergel A., et al., 1996a, A&A 315, L305
- Cesarsky D., Lequeux J., Abergel A., et al., 1996b, A&A 315, L309
- Charmandaris V., Mirabel I.F., Tran D., Laurent O., Cesarsky C.J., Gallais P., Sauvage M., Vigroux L., 1997, in *XVIIth Moriond Astrophysics Meeting: Extragalactic Astronomy in the Infrared*, p. 311
- Condon J.J., Huang Z.-P., Yin Q.F., Thuan T.X., 1991, ApJ 378, 65
- Désert F.-X., Boulanger F., Puget J.L., 1990, A&A 237, 215
- Désert F.-X., Puget J.-L., Clements D.L., et al., 1999, A&A 342, 363
- Douvion T., Lagage P.O., Ballet J., et al., 1998, in *ISO Conference: The Universe as seen by ISO*, p. 301
- Doyon R., Nadeau D., Joseph R.D., et al., 1995, ApJ 450, 111
- Dudley C.C., Wynn-Williams C.G., 1997, ApJ 488, 720
- Dudley C.C., 1999, MNRAS in press (astro-ph/9903250)
- Elmegreen D.M., Chromey F.R., Warren A.R., 1998, AJ 116, 2834
- Gallais P., Laurent O., Charmandaris V. et al., 1998, *ISO Conference: The Universe as seen by ISO*, p. 880
- Genzel R., Lutz D., Sturm E., et al., 1998a, ApJ 498, 579
- Genzel R., Lutz D., Tacconi L., 1998b, Nature 395, 859
- Giard M., Serra G., Caux E., Pajot F., Lamarre J.M., 1988, A&A 201, L1
- Goldader J.D., Joseph R.D., Doyon R., Sanders D.B., 1995, ApJ 444, 97
- Granato G.L., Danese L., Franceschini A., 1997, ApJ 486, 147
- de Grijp M.H.K., Miley G.K., Lub J., de Jong T., 1985, Nature 314, 240
- Hibbard J.E., van Gorkom J.H., 1996, AJ 111, 655
- Kessler M.F., Steinz J.A., Anderegg M.E. et al., 1996, A&A 315, L27
- Kim D.-C., Veilleux S., Sanders D.B., 1998, ApJ 508, 627
- Klein R., Henning T., Cesarsky D., 1999, A&A 343, L53
- Knapp G.R., Rupen M.P., 1996a, ApJ 460, 271

- 14
- Laurent et al.: Mid-infrared diagnostics to distinguish AGNs from starbursts
- Knapp G.R., Rupen M.P., Fich M., et al., 1996b, *A&A* 315, L75
- Knop R.A., Soifer B.T., Graham J.R., et al., 1994, *AJ* 107, 920
- Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V., et al., 1997, in *XVIIth Moriond Astrophysics Meeting: Extragalactic Astronomy in the Infrared*, p. 311
- Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V., et al., 1999, in *XIXth Moriond Astrophysics Meeting: Building the Galaxies: From the Primordial Universe to the Present*, p. 79
- Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V., et al., 2000, *A&A*, in preparation
- Léger A., Puget J.L., 1984, *A&A* 137, L5
- Léger A., D'Hendecourt L., Boissel P., et al., 1989, *A&A* 213, 351
- Lonsdale C.J., Smith H., Lonsdale C.J., 1993, *ApJ* 405, L9
- Lu N.Y., Helou G., Silbermann N. et al., in *ISO Conference: The Universe as seen by ISO*, p. 929
- Lutz D., Feuchtgruber H., Genzel R., et al., 1996a, *A&A* 315, L269
- Lutz D., Genzel R., Sternberg A., et al., 1996b, *A&A* 315, L137
- Lutz D., Spoon H.W.W., Rigopoulou D., Moorwood A.F.M., Genzel R., 1998, *A&A* 505, L103
- Madden S.C., Vigroux L., Sauvage M., 1997, in *XVIIth Moriond Astrophysics Meeting: Extragalactic Astronomy in the Infrared*, p. 229
- Madden S.C., Vigroux L., Sauvage M., 1999, in *ISO Conference: The Universe as seen by ISO*, p. 933
- Mathis J.S., 1990, *ARA&A* 28, 37
- Mattila K., Lemke D., Haikala L.K., et al., 1996, *A&A* 315, L353
- Mattila K., Lehtinen K., Lemke D., 1999, *A&A* 342, 643
- Moorwood A.F.M., Lutz D., Oliva E., et al., 1996, *A&A* 315, L125
- Mirabel I.F., Lutz D. & Maza J., 1991, *A&A* 243, 367
- Mirabel I.F., Vigroux L., Charmandaris V., et al., 1998, *A&A* 333, L1
- Mirabel I.F., Laurent O., Sanders D.B., et al., 1999, *A&A* 341, 667
- Onaka T., Yamamura I., Tanabe T., Roellig T.L., Yuen L., 1996, *PASJ*, 48, 59
- Oliva E., Moorwood A.F.M., Drapatz S., Lutz D., Sturm E., 1999, *A&A* 343, 943
- Papoular R., Conard J., Giuliano M., Kister J., Mille G., 1989, *A&A* 217, 204
- Pier E.A. & Krolik J.H., 1992, *ApJ* 401, 99
- Puget J.L. & Léger A., 1989, *ARA&A* 27, 161
- Read A.M., Ponman T.J., 1998, *MNRAS* 297, 143
- Rigopoulou D., Lutz D., Genzel R., et al., 1996, *A&A* 315, L125
- Roche P.F., Aitken D.K., Smith C., Ward M., 1991, *MNRAS* 248, 606
- Roussel H., Vigroux L., Sauvage M., 1999a, in *ISO Conference: The Universe as seen by ISO*, p. 957
- Roussel H., Vigroux L., Sauvage M., 1999b, *A&A* in preparation
- Sanders D.B., Mirabel I.F., 1996, *ARA&A* 34, 749
- Schulz B., Clavel J., Altieri B., et al., 1998, *ASP Conference Series* 146, 88
- Shlosman I., Frank J., Begelman M.C., 1989, *Nature* 338, 45
- Shlosman I., Begelman M.C., Frank J., 1990, *Nature* 345, 679
- Sloan G.C., Hayward T.L., Allamandola L.J., et al., 1999, *ApJ* 513, 65
- Smith H.E., Lonsdale C.J., Lonsdale C.J., 1998, *ApJ* 492, 137
- Starck J.L., Murtagh F., Pirenne B., Albrecht M., 1996, *PASP* 108, 446
- Starck J.L., Murtagh F., Bijaoui A., 1998, *Image Processing and Data Analysis*, Cambridge University Press
- Starck J.L., Abergel A., Aussel H., et al., 1999, *A&AS* 134, 135
- Terlevich R., Tenorio-Tagle G., Franco J., Melnick J., 1992, *MNRAS* 255, 713
- Tran D. 1998, PhD thesis, University of Paris XI, France
- Veilleux S., Kim D.-C., Sanders D.B., Mazzarella J.M., Soifer B.T., 1995, *ApJS* 98, 171
- Verstraete L., Puget J.L., Falgarone E., et al., 1996, *A&A* 315, L337
- Yun M.S., Scoville N.Z., Knop R.A., 1994, *ApJ* 430, 109

Spatial resolution bias in the mid-infrared Starburst/AGN classification

O. Laurent ¹, I.F. Mirabel ^{1,2}, V. Charmandaris ³, P. Gallais ¹,
M. Sauvage ¹, L. Vigroux ¹, C.J. Cesarsky ¹

¹ CEA/DSM/DAPNIA Service d'Astrophysique, F-91191 Gif-sur-Yvette, France.

² Instituto de Astronomía y Física del Espacio. cc 67, suc 28. 1428 Buenos Aires, Argentina.

³ Observatoire de Paris, DEMIRM, 61 Av. de l'Observatoire, F-75014 Paris, France.

Abstract

We present the effects of limited spatial resolution to the observed mid-infrared (MIR) spectrum of an active galactic nucleus (AGN) surrounded by a disk with massive star forming regions. Using MIR observations of the face-on nearby Seyfert 1 galaxy NGC 6814, we vary the observing aperture and examine the evolution of the observed AGN/starburst fraction with our MIR diagnostic. We show that the spatial resolution of ISOCAM is sufficient to disentangle AGN from starburst features in nuclear regions of nearby galaxies ($D < 50$ Mpc). However, with the exception of a few ultra-luminous galaxies, dilution effects hide completely the AGN contribution in more distant galaxies.

1 Introduction

Based on ground-based MIR observations ([10], [2]) and more recently with ISO ([7], [4] and references therein), considerable progress has been made in defining the fraction of the AGN/starburst contribution to the MIR spectral energy distribution (SED) of luminous infrared galaxies. To further examine the AGN and starburst connection, we have developed a new MIR diagnostic diagram using ISOCAM observations from 5 to $16\mu m$, which allows us to quantify emission due to AGNs from that resulting from star formation activity (see [5] for details). Our diagram is based on the fact that MIR spectra of late type galaxies — assuming that the stellar contribution to active/star forming regions is negligible — can be decomposed in three components characteristic of emission from HII regions, photo-dissociation regions (PDRs) and AGNs. Each component presents a unique signature: 1) the hot continuum at short wavelengths ($3-5\mu m$) is present in AGNs ([3], [2], [5]), 2) Unidentified Infrared Bands (UIBs) at 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 and $12.7\mu m$ are dominant in PDRs as well as in diffuse regions ([13], [11], [8]), and 3) a strong continuum due to emission from very small grains is detected in HII regions ([13], [1]). Due to the small physical size of the region which is heated directly by an AGN, a good spatial resolution is essential in order to probe the physics of the dust in nuclear regions hosting a weak AGN (i.e. where the MIR emission from the whole galaxy is largely higher than that from the AGN).

In order to examine how the spatial resolution of a telescope (in our case ISOCAM) may bias the detection of the MIR emission from an AGN and its surrounding star formation regions, we used NGC 6814, a nearby face-on Seyfert 1 galaxy located at 20 Mpc ($H_0=75\text{ km}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$) ([12]), as a test case. The following section displays the effects of dilution in the MIR spectrum when we observe galaxies at increasingly larger distances. In Section 3, we show in detail how the integration beam affects the MIR SEDs as well as the evolution of the observed spectrum on our diagnostic diagram. Finally, we comment on the expected results from future instruments such as SIRTf and the NGST.

2 Contamination of an AGN from circum-nuclear starbursts.

The imaging capabilities of ISOCAM provide an angular resolution of $5''$ - $8''$ at 7 - $15\mu\text{m}$ (250-400 pc at 10 Mpc). Even though in some extreme cases of ultra-luminous galaxies (e.g. IRAS 19254-7245 in [6] and IRAS 23060+0505 in [3]), the AGN contribution may completely dominate the total emission coming from a galaxy, the MIR emission in most galaxies of our sample containing an AGN is dominated by their disk emission. As a consequence, a good spatial resolution is necessary to separate galactic nuclei (~ 1 kpc in diameter) and to distinguish emission from an AGN. Moreover, intrinsic absorption particularly in Seyfert 2 galaxies can hide the AGN even in the MIR making its detection difficult. We present in Figure 1 images of NGC 6814 projected at different distances as well as their corresponding SEDs. Given a fixed aperture of $9''$ (3 pixels at $3''/\text{pixel}$), we note the increase of UIBs associated with star forming regions in the galactic disk by observing distant galaxies. The AGN continuum is still detected at 50 Mpc, but it becomes negligible at 100 Mpc.

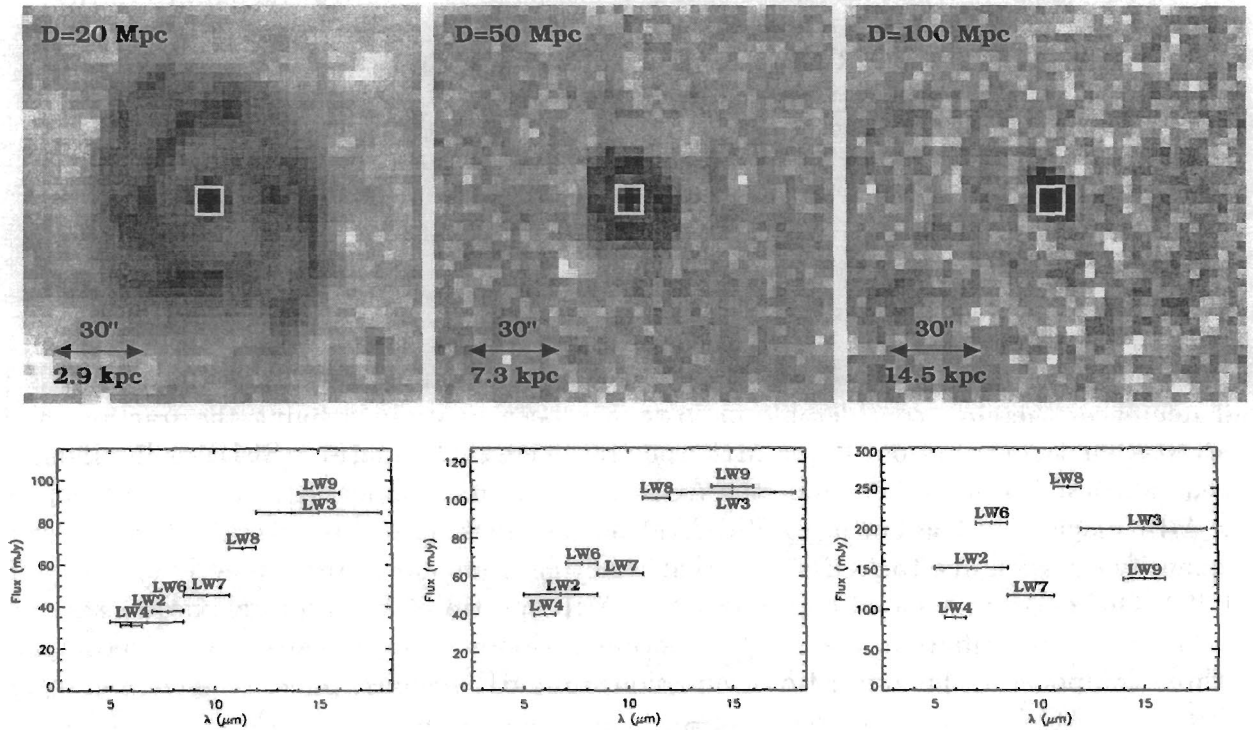


Figure 1: Effects of the spatial resolution in a MIR AGN spectrum. As an example, we use the Seyfert 1 galaxy NGC 6814 actually located at ~ 20 Mpc ($H_0 = 75 \text{ km}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$). Left panel, we show an image of NGC 6814 in the 7 - $8.5\mu\text{m}$ band tracing mainly the UIB feature at $7.7\mu\text{m}$. Middle panel, the galaxy is projected to a distance of 50 Mpc. Right panel, the projected distance is increased to 100 Mpc. For each distance, we calculate the flux inside a constant ISOCAM aperture given by 3×3 pixels (i.e. $9'' \times 9''$, see SEDs underneath images). We have also applied an aperture correction to get spectra comparable to those in Figure 2.

3 MIR spectral classification: from an AGN to a galactic disk.

Our new MIR diagnostic diagram classification method is based on the UIB strength ($\text{LW2}(5\text{-}8.5\mu\text{m})/\text{LW4}(5.5\text{-}6.5\mu\text{m})$) and the slope of the MIR continuum ($\text{LW3}(12\text{-}18\mu\text{m})/\text{LW2}(5\text{-}8.5\mu\text{m})$) ([5]). In Figure 2, we present 8 SEDs corresponding to aperture diameters from $9''$ (nucleus) to $93''$ (whole galaxy) where we can observe the evolution from “pure” AGN spectrum to “pure” PDR spectrum (i.e. the AGN continuum is not detected). We can note the importance of the spatial resolution to find out MIR AGN features in our diagnostic diagram.

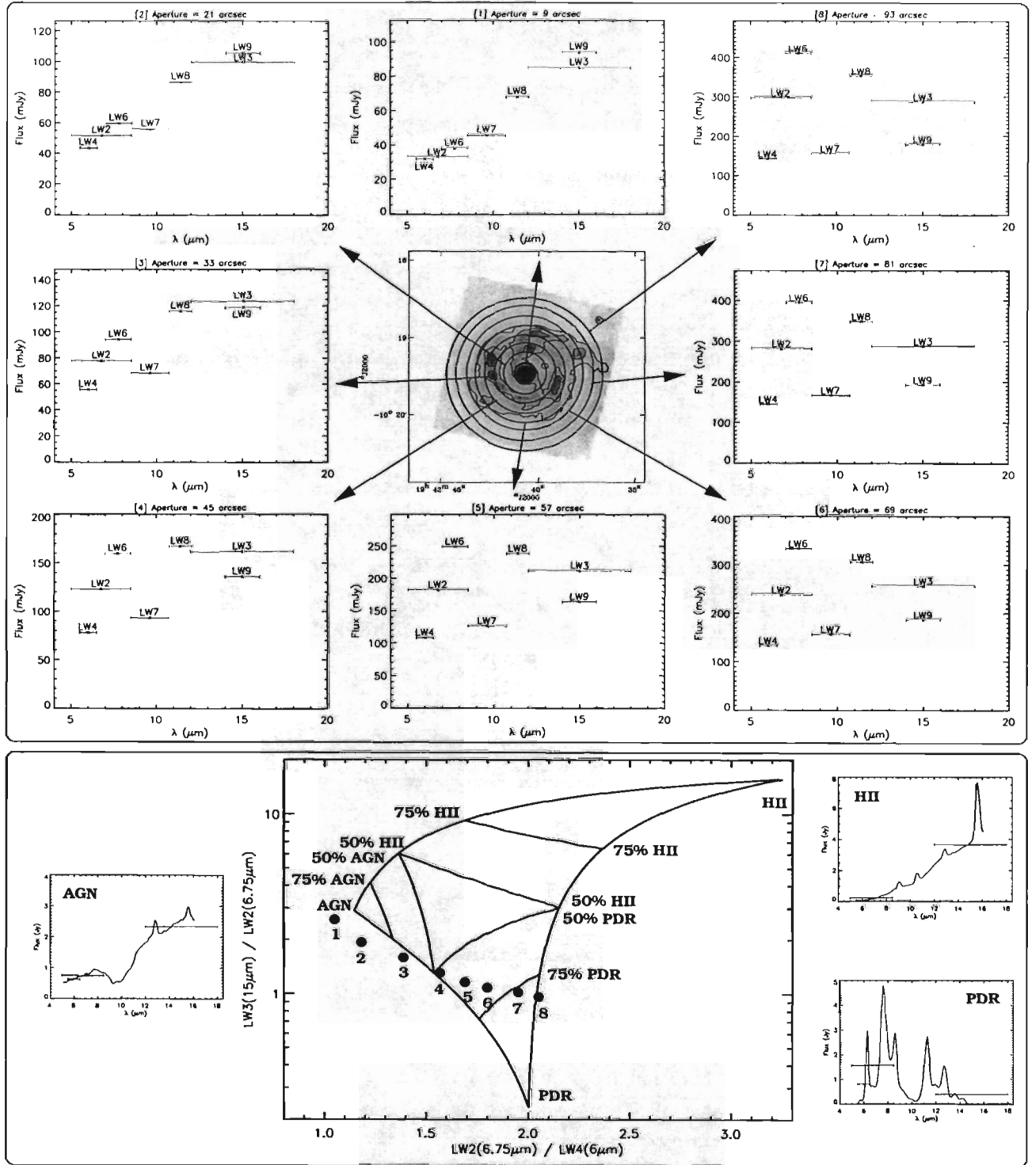


Figure 2: Top panel: variation of the MIR emission as a function of the size of the integrating aperture. We can follow (counter-clockwise) the evolution of the shape of the SED for each aperture radius from the AGN (Spectrum 1) to the total integrated galaxy (Spectrum 8). Note the absence of UIBs and the strong rising continuum at short wavelengths ($5\text{--}8.5\mu\text{m}$) in the central region (Spectrum 1) typical of AGN emission. By increasing the aperture radius, the disk contribution dominated by UIBs contaminates the AGN emission. Bottom panel: application of our MIR diagram ([5]), for all SEDs. Each point corresponds to a spectrum marked from 1 to 8. The percentages indicate the fraction in the MIR ($5\text{--}16\mu\text{m}$) of each template, in the observed spectra. The increasing disk contribution changes our classification from “AGN-like” to the “PDR-like”, which is typical to galactic disks. The AGN dominates the MIR emission only for small apertures smaller than $45''$ in diameter (up to spectrum 4 with diameter = 4.3 kpc).

ISOCAM was the first instrument allowing us deep imaging covering the total wavelength range between 5 and $16\mu\text{m}$. Our diagnostic method can successfully detect the presence of an AGN in galaxies. However, it is limited to finding AGNs in nearby galaxies at distances less than 50 Mpc with the exception of some ultra-luminous galaxies powered principally by AGN. For galaxies at $z > 0.1$, the redshift effect begins to play an important role since we look at through fixed broad band filters and as a consequence the shape of our diagnostic changes.

MIR observations IR-luminous galaxies at distances up to $z=1$, require new infrared instruments such as SIRTf and the NGST who will provide better spatial resolution to study the relationship between starburst and AGN emission. Moreover, due to their higher sensitivity, one could also compare our results with other MIR diagnostic based on ionic lines of high excitation levels which trace the presence of the AGN radiation field ([3]). These two methods are complementary since forbidden line emission due to an AGN in high resolution spectra can be easily identified in a spectrum (see the SWS spectrum of Circinus in [9]) even when a starburst is dominating the total MIR emission.

4 Conclusions

Studying the effects of spatial resolution in our MIR spectra we conclude that:

- 1) Our MIR diagnostic diagram based on the ISOCAM spatial resolution ($\sim 8''$) can detect the presence of AGNs in late type galaxies only in the local Universe ($D < 50$ Mpc).
- 2) Some AGNs associated with ultra-luminous "monsters", which are encountered in merging systems and dominating the integrated MIR emission, can be detected at large distance such as IRAS 19254-7245 located at 250 Mpc.
- 3) Future instruments with higher spatial resolution will provide better estimates of the AGN/starburst fraction in more distant galaxies ($D > 50$ Mpc).

References

- [1] Cesarsky D., Lequeux J., Abergel A., et al., 1996, *Astr. Astrophys.* **315**, L309
- [2] Dudley C.C, 1999, *MNRAS*, in press (*astro-ph/9903250*)
- [3] Genzel R., Lutz D., Sturm E. et al., 1998, *Astrophys. J.* **4**, 98, 579
- [4] Genzel R., Lutz D., Tacconi L., 1998, *Nature* **395**, 29
- [5] Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V. et al., 1999, *Astr. Astrophys.*, submitted
- [6] Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V. et al., 1999, in preparation
- [7] Lutz D., Spoon H.W.W., Rigopoulou D., Moorwood A.F.M., Genzel R., 1998, *Astr. Astrophys.* **505**, L103
- [8] Mattila K., Lehtinen K., Lemke D., 1999, *Astr. Astrophys.* **342**, 643
- [9] Moorwood A.F.M., Lutz D., Oliva E., *Astr. Astrophys.* **315**, L109
- [10] Roche P.F., Aitken D.K., Smith C., Ward M., 1991, *MNRAS* **248**, 606
- [11] Tran D., 1998, *PhD thesis, University of Paris XI, France*
- [12] Ulrich M.-H., 1971, *Astrophys. J.* **165**, L61
- [13] Verstraete L., Puget J.L., Falgarone E., et al., 1996, *Astr. Astrophys.* **315**, L337

Chapitre 7

Application sur les galaxies lointaines

Sommaire

7.1	Introduction	141
7.2	Diagrammes de diagnostics jusqu'à $z=1$	141
7.3	La contamination par les étoiles	144
7.4	Implications sur les observations avec SIRTf.	146

7.1 Introduction

L'étude des galaxies proches nous a permis de définir les principales propriétés spectrales des galaxies dans l'univers local jusqu'à $z=0.08$ avec IRAS 14348-1447. Pour observer l'univers plus lointain, les filtres larges LW2(5-8.5 μm) et LW3(12-18 μm) sont nécessaires pour pouvoir détecter les galaxies faibles ce qui rend l'interprétation du type d'émission infrarouge délicate. Les observations profondes ISOCAM permettent d'étudier des galaxies jusqu'à $z=1.3$ (voir Aussel, 1999). Les effets dus au décalage spectral vers le rouge ("redshift" en anglais) font que les filtres LW2 et LW3 ne sélectionnent plus les mêmes domaines spectraux par rapport à l'univers proche. A partir des spectres CVF prototypes caractérisant les AGNs ou les starbursts, nous allons appliquer la correction en redshift à notre diagramme de diagnostics basé sur les filtres larges.

7.2 Diagrammes de diagnostics jusqu'à $z=1$

Nous devons étendre de domaine spectral des spectres prototypes utilisés pour créer la bibliothèque spectrale. En effet, nous n'avons pas accès avec les spectres CVF du détecteur à grandes longueurs d'onde à l'émission entre 2.5 et 5 μm pour pouvoir appliquer une correction en redshift sur le filtre LW2(5-8.5 μm) jusqu'à $z=1$. Pour cela, nous avons extrapolé jusqu'à 2.5 μm le continuum HII par un corps noir et celui de l'AGN par une loi de puissance qui s'ajustent aux spectres entre 5 et 16 μm . Pour le spectre composé d'UIBs, on a laissé l'émission à zéro en considérant que les UIBs contribuent

faiblement en-dessous de $5\mu\text{m}$ par rapport aux différents continua. En appliquant une correction en redshift sur les spectres ainsi obtenus nous modifions les intervalles de sélection AGN/PDR/HII du diagramme (voir Fig. 7.1 et Fig. 7.2).

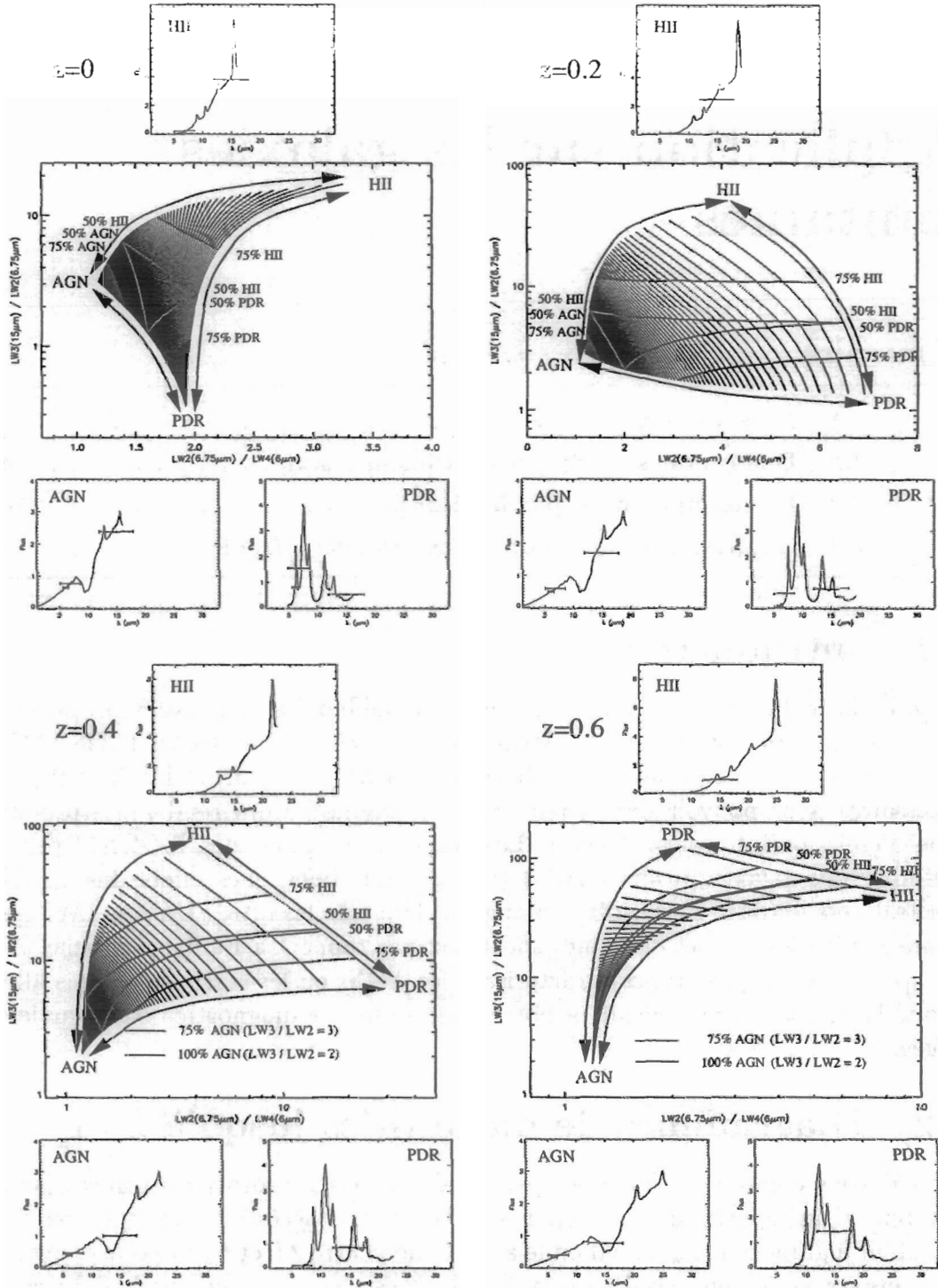


FIG. 7.1 – Diagrammes de diagnostics (AGN/HII/PDR) pour différents redshifts ($z = 0, 0.2, 0.4, 0.6$).

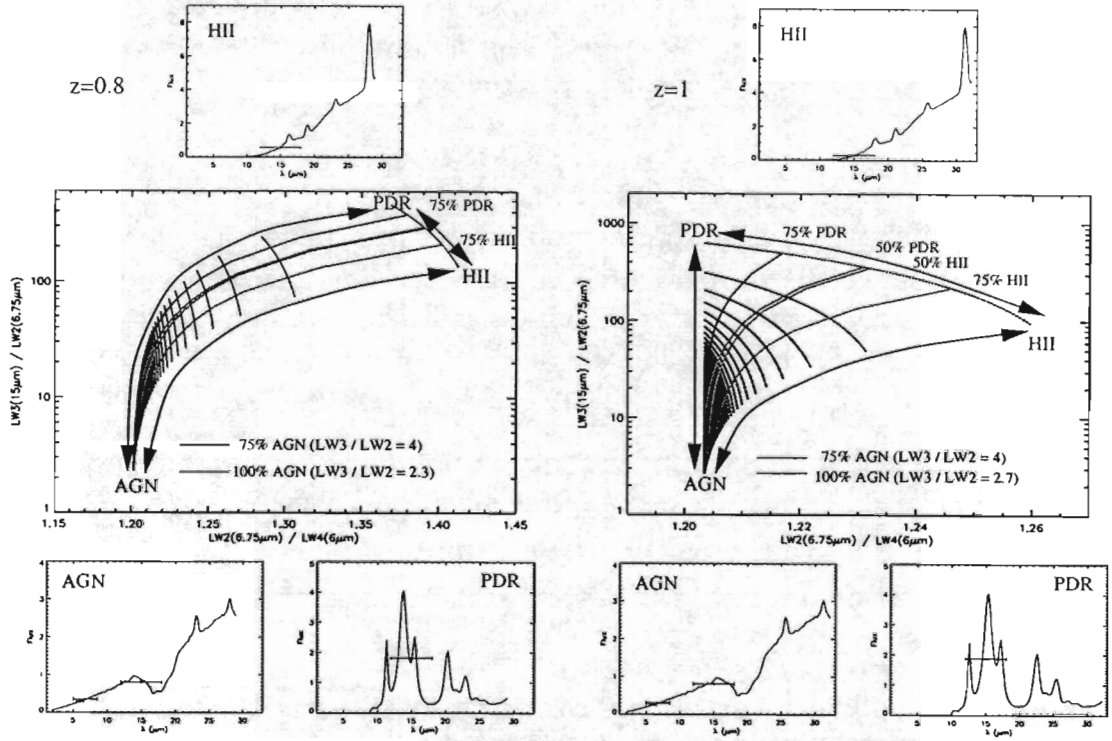


FIG. 7.2 – Diagrammes de diagnostics (AGN/HII/PDR) pour différents redshifts ($z = 0.8, 1$).

Les rapports $LW2/LW4$ ne pouvant servir aux observations profondes, nous nous occupons essentiellement de l'axe Y défini par le rapport $LW3/LW2$. L'effet du redshift a pour première conséquence de diminuer le flux dans $LW2$ en déplaçant les UIBs en dehors de ce filtre. L'effet est très rapide car l'UIB la plus intense à $7.7 \mu m$ sort à partir de $z = 0.2$ de la bande spectrale de $LW2$. Les rapports $LW3/LW2$ pour les régions starbursts contenant des UIBs augmentent considérablement alors qu'ils restent relativement stables pour les AGNs et les régions pures HII qui ne présentent pas d'UIBs.

- Les spectres de galaxies normales dans l'univers local ont un rapport $LW3/LW2 = 1$ qui évolue rapidement vers des valeurs de l'ordre de 2-3 pour $z=0.2$ et de 10 pour $z=0.4$.
- Les AGNs se caractérisent par des rapports $LW3/LW2$ qui restent stables aux alentours de 2-3.

Les grandes valeurs du rapport restent très incertaines car elles dépendent fortement des spectres prototypes définis au départ. Il est intéressant de noter que jusqu'à $z=0.2$ nous ne pouvons utiliser $LW3/LW2$ pour distinguer les AGNs des starbursts. À $z=0.4$ et plus, grâce à la correction en redshift, l'AGN peut être identifié par rapport aux régions starbursts en bas du diagramme.

À partir de $z = 0.4$, dans les galaxies dominées par l'émission de la poussière (starburst ou AGN), des rapports $LW3/LW2$ faibles de l'ordre de 2 à 4 devraient permettre de

sélectionner les AGNs par rapport aux starbursts. La difficulté consiste à être assez sensible pour pouvoir détecter les sources dans les deux filtres (voir Aussel, 1999 pour une description des champs profonds ISOCAM).

7.3 La contamination par les étoiles

Dans l'intervalle $2-5\mu\text{m}$ que l'on observe avec le filtre LW2 à $z=0.5-1$, la contribution des étoiles peut ne pas devenir négligeable alors qu'elle n'intervenait pas dans l'émission entre 5 et $16\mu\text{m}$. La contribution stellaire se caractérise toujours par un rapport $\text{LW3}/\text{LW2} < 1$ indépendamment du décalage spectral alors car l'AGN présente un rapport situé entre 2 et 5. Il est donc facile de les séparer quand l'un d'entre eux domine l'émission. Le problème se complique quand la contribution stellaire est faible, on ne peut la distinguer de celle de l'AGN. Sur les diagrammes des figures 7.3 et 7.4, les régions dominées par la composante stellaire ont un rapport $\text{LW3}/\text{LW2} < 1$. Néanmoins, une contribution stellaire plus faible peut donner un rapport de 2-5 similaire aux AGNs purs. Il est nécessaire dans ce cas de pouvoir estimer la forme du continuum dans l'infrarouge proche à $2.2\mu\text{m}$ en bande K.

D'une manière générale, une faible contribution stellaire est difficilement distinguable vis à vis du continuum d'un AGN en observant uniquement l'émission entre 5 et $16\mu\text{m}$. L'infrarouge proche en bande J($1.2\mu\text{m}$) soit K($2.2\mu\text{m}$) à $z=1$ devrait permettre d'estimer plus efficacement la contribution stellaire.

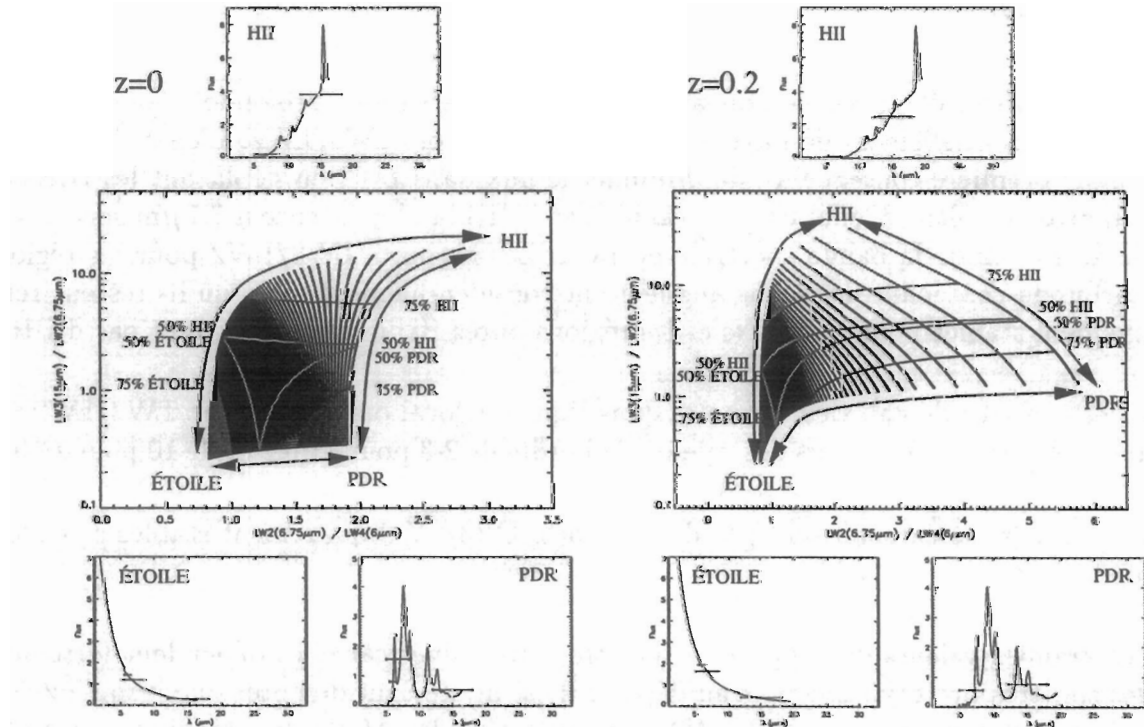


FIG. 7.3 – Diagrammes de diagnostics (Étoile/HII/PDR) pour différents redshifts ($z=0, 0.2$). Un corps noir à $T=3500\text{ K}$ a été utilisé pour modéliser la composante stellaire associée aux étoiles évoluées (faible température de surface avec $T\sim 3000-4000\text{ K}$)

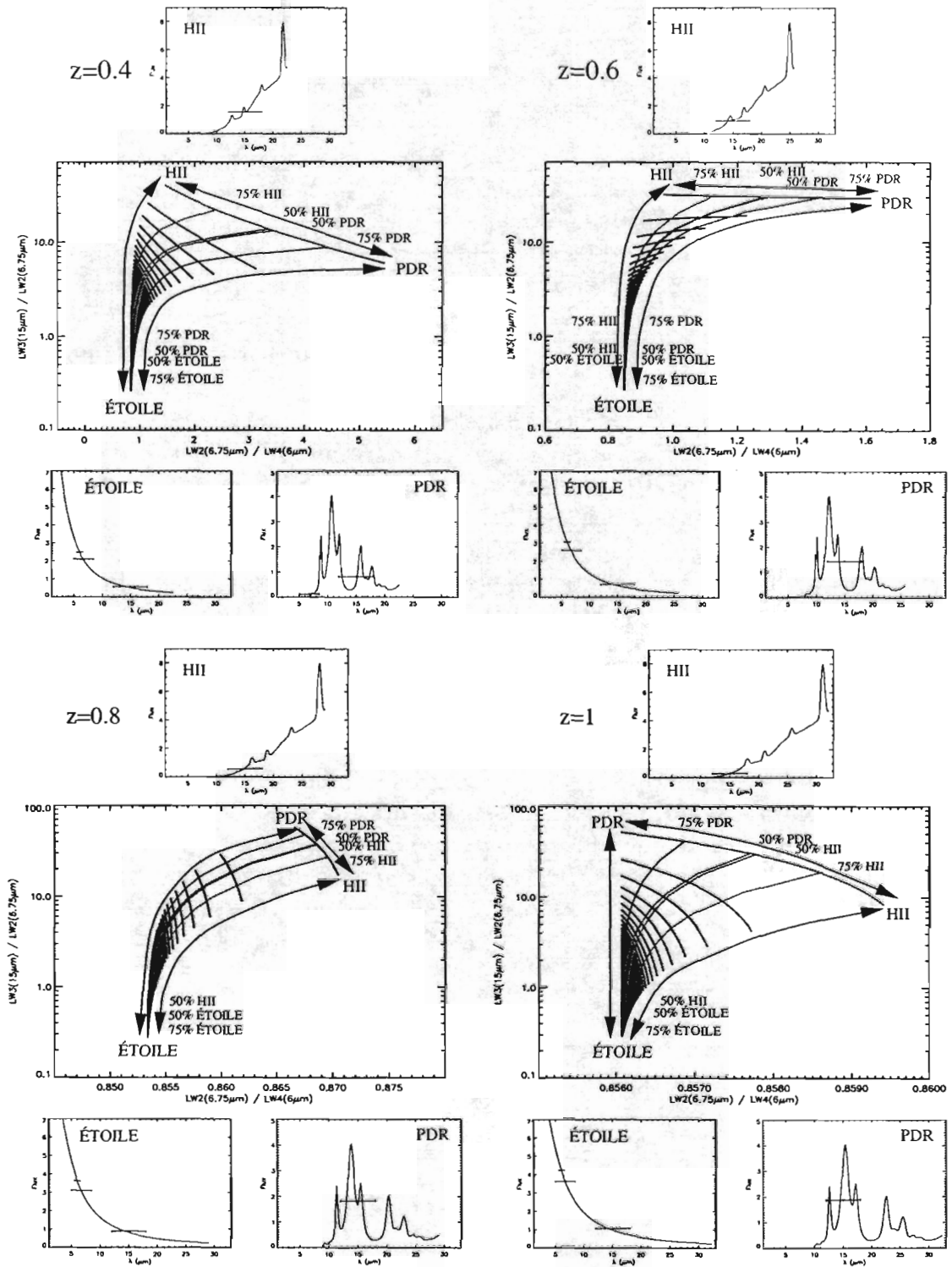


FIG. 7.4 – Diagrammes de diagnostics (Étoile/HII/PDR) pour différents redshifts ($z = 0.4, 0.6, 0.8, 1$).

7.4 Implications sur les observations avec SIRTf.

De nouvelles missions satellites vont permettre d'étendre les observations dans l'infrarouge moyen vers des objets plus lointains grâce à une meilleure sensibilité des instruments. Le satellite infrarouge SIRTf ("Space Infrared Telescope Facility" en anglais) qui doit être lancé en décembre 2001 permettra de compléter les études réalisées par ISO. Il possède trois instruments destinés à faire de l'imagerie entre 3 et 8 μm (IRAC), de la spectroscopie entre 4 et 40 μm (IRS) et de la photométrie en infrarouge lointain de 24 à 160 μm (MIPS).

Les instruments IRS et IRAC permettront de couvrir en partie le domaine spectral d'ISOCAM.

- La spectroscopie à faible ($R = 60-120$) et haute résolution ($R = 600$) va permettre de détecter l'ensemble des raies en émission les plus intenses associées aux starbursts ([ArII], [ArIII], [NeII], [NeIII], [SIII]) et aux AGNs ([NeV], [NeVI], [OIV]). La détection de ces raies dans un plus vaste échantillon de galaxies devrait permettre de compléter les diagnostics basés sur les rapports de raies (Genzel et al., 1998a). La spectroscopie à faible résolution couvrira une région spectrale plus étendue que celle d'ISOCAM en allant de 5 à 40 μm . Ainsi, les critères de sélection AGN/Starburst déduits des spectres CVF pourront être appliqués sur les spectres IRS.

- L'instrument IRAC sera dédié à l'imagerie avec quatre filtres larges à 3.6, 4.5, 5.8 et 8 μm . La résolution spatiale reste proche de celle d'ISO, néanmoins la taille des détecteurs (256×256 pixels avec $1.2''/\text{pixel}$) donnera un large champ de vue de $5.12' \times 5.12'$. Ces différents filtres seront donc sensibles aux bandes infrarouges à 6.2, 7.7 et 8.6 μm ainsi qu'au continuum entre 3 et 6 μm . A partir des spectres ISOCAM, on a simulé les variations du rapport de deux filtres larges à 5.8 et 8 μm (voir Fig. 7.5). Ce rapport est très similaire à $\text{LW2}(6.75 \mu\text{m})/\text{LW4}(6 \mu\text{m})$ et permet de séparer les AGNs des starbursts. On note sur la figure 7.6 que les AGNs sont localisés dans la partie la plus à gauche du diagramme avec comme limite $\text{IRAC}(8 \mu\text{m})/\text{IRAC}(5.8 \mu\text{m}) < 2$. L'autre diag-

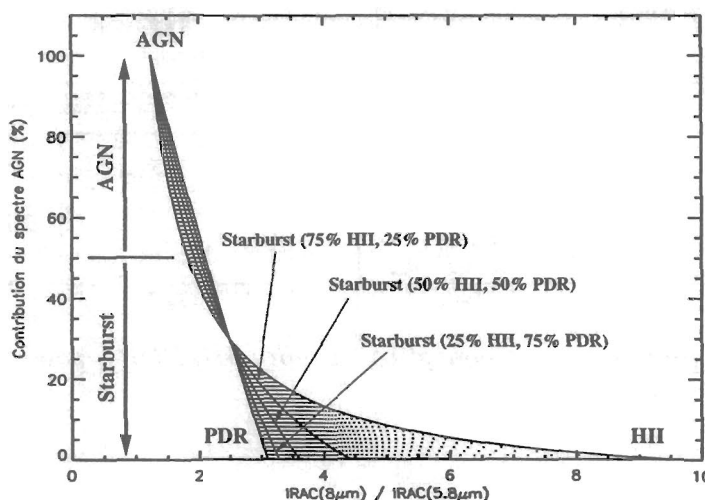


FIG. 7.5 – Evolution du rapport AGN/Starburst avec SIRTf.

nostic utilisé sur l'axe Y est similaire au rapport $LW3(15\mu m)/LW2(6.75\mu m)$. L'instrument IRAC ne possédant pas de filtres au-delà de $8\mu m$, nous pouvons utiliser le flux équivalent à $12\mu m$ IRAS ou ISO. L'évolution en redshift des diagrammes est aussi très similaire à celle obtenue précédemment avec les critères ISOCAM-LW.

DIAGRAMME DE DIAGNOSTICS IRAC/SIRTf

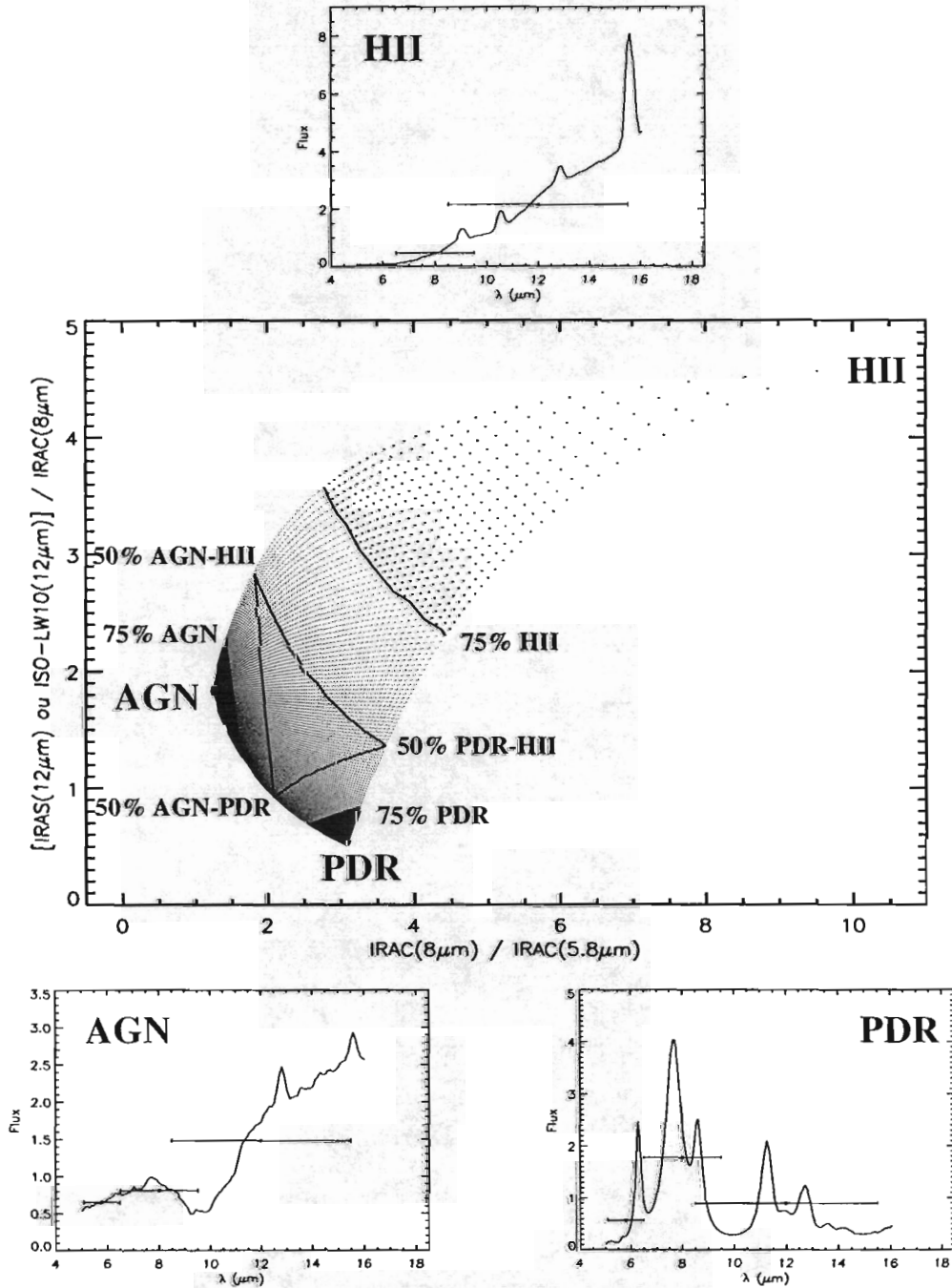


FIG. 7.6 – Diagramme de diagnostics pour l'instrument IRAC de SIRTf.

Quatrième partie

Conclusion

Chapitre 8

Résultats

Ma thèse a consisté en l'étude des galaxies *actives* et *starbursts* dans l'infrarouge moyen avec ISOCAM. Une trentaine d'objets extragalactiques a ainsi pu être étudiée dans l'infrarouge moyen soit avec le mode imagerie donnant une résolution de 5" soit en mode combiné spectro-imagerie à faible résolution spectrale ($\lambda/\Delta\lambda \sim 40$).

Je commencerai par exposer les principaux résultats de ma thèse obtenus à partir des spectres continus du mode spectro-imagerie. J'aborderai ensuite les résultats provenant de l'imagerie en filtres larges.

1) L'étude des spectres en infrarouge moyen de galaxies proches m'a conduit à séparer 4 types distincts d'émission observés dans les spectres intégrés de galaxies. Chacun d'entre eux se caractérise par des *signatures spectrales uniques* dans l'infrarouge moyen entre 5 et 16 μm . Je montre que l'on peut utiliser l'infrarouge moyen pour classer les galaxies en supposant que dans la plupart des galaxies, nous observons un mélange de ces différentes contributions.

Je résume ici les propriétés uniques associées à chaque contribution en termes de signatures spectrales:

- **Emission des étoiles évoluées** (prototype: NGC 4649): Continuum décroissant de 5 à 16 μm produit par l'émission Rayleigh-Jeans des étoiles évoluées à $T \sim 3500-4000$ K.
- **Emission des PDRs et régions diffuses** (prototype: NGC 7023): Les bandes infrarouges non-identifiées observées essentiellement à 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 et 12.7 μm .
- **Emission des régions HII** (prototype: M 17): Continuum croissant de 5 à 16 μm produit par les très petits grains ($T \sim 200$ K) émettant essentiellement au delà de 10 μm .
- **Emission des AGNs** (prototype: Cen A): Important continuum à courtes longueurs d'onde (< 10 μm) produit par la poussière très chaude (500-1000 K) chauffée par l'AGN.

A partir de ces propriétés, j'ai pu définir des *diagnostics* spectraux basés uniquement sur les *UIBs* et le *continuum*. La combinaison de ces différents indicateurs permet d'obtenir une classification des galaxies normales, starbursts et actives basée sur leurs spectres en infrarouge. L'une des applications les plus importantes consiste à distinguer les *starbursts* des *AGNs* uniquement à l'aide de leur spectre en infrarouge moyen.

Ces diagrammes m'ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes:

- La galaxie "Super-Antennea" (IRAS 19254-7245) est la seule galaxie ultralumineuse

parmi les 7 de mon échantillon à être dominée par la contribution de l'AGN entre 5 et $16\ \mu\text{m}$.

- Les spectres des galaxies lumineuses NGC 3690B et Arp 236 classés comme starburst suggèrent l'existence d'un AGN contribuant respectivement à 70 % et 40 % de la luminosité à 5- $16\ \mu\text{m}$.

- L'efficacité de formation d'étoiles pour des galaxies non contaminées par l'AGN peut être estimée à l'aide du rapport classique $\text{LW3}(12-18\ \mu\text{m})/\text{LW2}(5-8.5\ \mu\text{m})$. On sélectionne avec $\text{LW3}/\text{LW2} < 1.5$ les régions à faible activité de formation d'étoiles rencontrées essentiellement dans les disques de galaxies spirales. Les galaxies starbursts comme M 82 ou encore Arp 220 possèdent des rapports plus grands avec $\text{LW3}/\text{LW2} \sim 2$ et 5 respectivement.

- Le seul rapport $\text{LW3}(12-18\ \mu\text{m})/\text{LW2}(5-8.5\ \mu\text{m})$ ne permet pas de distinguer dans l'univers local ($z < 0.1$) les starbursts par rapport aux AGNs.

- A partir de l'échantillon de galaxies de Lutz et al. (1998), nous trouvons que $\sim 35\%$ des galaxies ultralumineuses contiennent un AGN dominant au moins 75 % de l'émission en infrarouge moyen. En dessous de $\log(L_{\text{IR}})=12.3$, la fraction d'ULIRGs dominée à plus de 75 % par l'AGN chute à 30 %. Néanmoins, pour des luminosités supérieures à $\log(L_{\text{IR}})=12.3$, cette fraction augmente à 60 %, ce qui suggère que la luminosité en infrarouge moyen pour les galaxies ultralumineuses les plus brillantes est dominée par l'AGN.

- Ces diagnostics permettent également de suivre l'évolution des spectres de galaxies en fonction du redshift. Pour $z > 0.2$, le filtre $\text{LW2}(5-8.5\ \mu\text{m})$ sélectionne essentiellement le continuum provenant de la poussière chaude des AGNs ou de l'émission stellaire dans le cas de galaxies elliptiques.

2) Les résultats provenant d'observations en mode imagerie en filtres larges ont été obtenus sur des objets proches bien résolus spatialement.

- On a mis en évidence une structure bisymétrique à 7 et $15\ \mu\text{m}$ au cœur de la galaxie Cen A. Cette structure est interprétée comme étant une barre capable d'alimenter l'AGN en gaz. La co-existence de ces deux systèmes symbiotiques (galaxie elliptique et barrée) pourraient être un mécanisme commun aux radio-galaxies à doubles lobes qui nécessitent une alimentation continue en matière vers le trou noir central.

- Les collisions de galaxies sont capables de produire des régions starbursts extranucléaires plus intenses que dans les noyaux comme dans le cas des "Antennes" ou de "Cartwheel" avec des rapports $\text{LW3}/\text{LW2} \sim 5$ similaires à Arp 220. Les sites les plus intenses en formation d'étoiles peuvent ainsi exister à quelques kiloparsecs des noyaux et rester en grande partie obscurcis dans l'optique.

Chapitre 9

Publications

Sommaire

9.1	Articles à comité d'évaluation:	153
9.2	Articles en préparation:	153
9.3	Comptes rendus de présentations.	154
9.4	Comptes rendus de "posters"...	154

9.1 Articles à comité d'évaluation:

- A barred spiral at the centre of the giant elliptical radio galaxy Centaurus A
Mirabel I.F., Laurent O., Sanders D.B., Sauvage M., Tagger M., Charmandaris V., Vigroux L., Gallais P., Cesarsky C.J., Block D.L., 1999, A&A 341, 667
- Dust in the Wheel: The Cartwheel galaxy in the Mid-IR
Charmandaris V., Laurent O., Mirabel I.F., Gallais P., Sauvage M., Vigroux L., Cesarsky C.J., Appleton P.N., 1999, A&A 341, 69
- Mid-infrared diagnostics to distinguish AGNs from starburts
Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V., Gallais P., Madden S.C., Sauvage M., Vigroux L., Cesarsky C.J., soumis à A&A.

9.2 Articles en préparation:

- Mid-infrared observations of the ultraluminous galaxies IRAS 19254-7245, IRAS 23128-5919 and IRAS 14348-1447
Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V., Gallais P., Madden S.C., Sauvage M., Vigroux L., Cesarsky C.J., pour être soumis à A&A.
- Mid-infrared imaging of two merger remnants: Arp 220 and NGC 6240
Charmandaris V., Laurent O., Mirabel I.F., Tran D., Gallais P., Sauvage M., Vigroux L., Cesarsky C.J., pour être soumis à A&A.

9.3 Comptes rendus de présentations.

- ISOCAM observations of the Seyfert 2 galaxy NGC 3147

Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V., Sauvage M., Gallais P., Vigroux L., Cesarsky C.J., XXXIInd Rencontres de Moriond: Extragalactic Astronomy in the Infrared, Les Arcs, 15-22 mars 1997, 321.

- ISOCAM observations of Arp 220

Charmandaris V., Mirabel I.F., Tran D., Laurent O., Gallais P., Sauvage M., Vigroux L., Cesarsky C.J., XXXIInd Rencontres de Moriond: Extragalactic Astronomy in the Infrared, Les Arcs, 15-22 mars 1997, 283.

- The mid-IR spectral properties of starburst galaxies and active galactic nuclei

Laurent O., Mirabel I.F., IAU Symposium 194 in Armenia, 17-21 août 1998.

- Feeding the central engine in giant radio galaxies

Mirabel I.F., Laurent O., IAU Symposium 194 in Armenia, 17-21 août 1998.

- A new mid-infrared diagnostic between AGNs and starbursts

Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V., Gallais P., Sauvage M., Vigroux L., Cesarsky C.J., Euroconference: "The Evolution of Galaxies on Cosmological Timescales" à Tenerife, publication dans les "ASP Conference Series", 30 novembre - 5 décembre 1998.

- The mid-infrared view of star formation in collisional ring galaxies

Charmandaris V., Laurent O., Mirabel I.F., Gallais P., Sauvage M., Vigroux L., Cesarsky C.J., Appleton P.N., Euroconference: "The Evolution of Galaxies on Cosmological Timescales" à Tenerife, publication dans les "ASP Conference Series", 30 novembre - 5 décembre 1998.

- Spatial resolution bias in the mid-infrared Starburst/AGN classification

Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V., Gallais P., Sauvage M., Vigroux L., Cesarsky C.J., XXXIVnd Rencontres de Moriond: Building the galaxies: from the primordial Universe to the present, Les Arcs, 13-20 mars 1999.

- Nearby Active and Starburst Galaxies as seen with ISOCAM

Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V., Gallais P., Sauvage M., Vigroux L., Cesarsky C.J., Conférence "A New Millennium for Galaxy Morphology" en Afrique de Sud, publication dans les "ASP Conference Series", 13-18 septembre 1999.

9.4 Comptes rendus de "posters".

- The AGNs and their host galaxies as seen in the mid-infrared

Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V., Gallais P., Sauvage M., Vigroux L., Ce-

sarsky C.J., Poster presentation, Conference on "ULIRGS: Monsters or babies" au château de Ringberg, publication dans les "ASP Conference Series", 21-26 septembre 1998.

- The mid-IR view of interacting galaxies

Charmandaris V., Laurent O., Mirabel I.F., Gallais P., Sauvage M., Vigroux L., Cessarsky C.J., Appleton P.N., Conference on "ULIRGS: Monsters or babies" au château de Ringberg, publication dans les "ASP Conference Series", 21-26 septembre 1998.

- The mid-IR spectral properties of starburst galaxies and AGNs seen by ISOCAM

Laurent O., Mirabel I.F., Charmandaris V., Gallais P., Sauvage M., Vigroux L., Cessarsky C.J., ISO conference "The Universe as seen by ISO", 20-23 octobre 1998 à Paris.

- ISOCAM observations of the interacting galaxy system Mrk 171

Gallais P., Laurent O., Charmandaris V., Rouan D., Mirabel I.F., Sauvage M., Tran D., Vigroux L., ISO conference "The Universe as seen by ISO", 20-23 octobre 1998 à Paris.

- Mid-IR imaging of collisional ring galaxies with ISOCAM

Charmandaris V., Laurent O., Mirabel I.F., Gallais P., Sauvage M., Vigroux L., Cessarsky C.J., ISO conference "The Universe as seen by ISO", 20-23 octobre 1998 à Paris.

- Mid-IR imaging of Toomre's Merger Sequence

Charmandaris V., Laurent O., Mirabel I.F., Gallais P., 15th IAP meeting in Paris, "Galaxy Dynamics: from the Early Universe to the Present", publication dans les "ASP Conference Series", 9-13 juillet 1999, p.177.

Chapitre 10

Perspectives

L'infrarouge moyen entre 5 et $16\ \mu\text{m}$ nous a permis de distinguer l'émission provenant des régions starbursts ou des AGNs grâce l'utilisation de critères spectroscopiques basés uniquement sur les UIBs et le continuum.

L'étude effectuée jusqu'à présent a porté sur environ une trentaine de galaxies.

- Les données publiques ISOCAM ainsi que celles obtenues par ISOPHOT-S ($6\text{--}12\ \mu\text{m}$) vont nous permettre d'étendre notre étude.
- Le satellite infrarouge SIRTf lancé en décembre 2001 sera également capable d'observer en mode imagerie de 3.6 à $8\ \mu\text{m}$ avec une meilleure sensibilité ($5\text{--}34\ \mu\text{Jy}$). Par exemple, un faible rapport $\text{IRAC}(8\ \mu\text{m})/\text{IRAC}(3.63\ \mu\text{m})$ pourrait être utilisé comme critère pour identifier la présence du continuum de l'AGN. De plus, la meilleure sensibilité spectrale ($0.55\ \text{mJy}$) à $15\ \mu\text{m}$ devrait révéler la présence de la raie du $[\text{NeV}]$ ($14.3\ \mu\text{m}$) non-détectée dans les galaxies ultralumineuses possédant un AGN sélectionné en X ou en optique (ex: NGC 6240).

Cependant, dans la plupart des cas, la détection de l'AGN au travers de son continuum est limitée à des galaxies proches ($D < 50\ \text{Mpc}$) pour lesquelles la résolution de $5''$ s'est révélée suffisante pour séparer le noyau du disque. Au-delà, on ne peut détecter un AGN que si celui-ci domine l'émission intégrée de la galaxie comme dans le cas des "Super Antennes". Une des premières améliorations des critères de détection des AGNs consiste à observer avec une meilleure résolution spatiale ($\sim 1''$) le noyau des galaxies pour être capable de séparer les starbursts circum-nucléaires des AGNs dans l'infrarouge moyen.

- Dans le proche infrarouge ($< 5\ \mu\text{m}$), l'UIB à $3.3\ \mu\text{m}$ est accessible aux télescopes au sol (VLT avec l'instrument ISAAC). De plus, le continuum de poussières chaudes observé à $3\ \mu\text{m}$ provient essentiellement de l'AGN à la différence du continuum entre 5 et $10\ \mu\text{m}$ où celui des régions starbursts peut contribuer faiblement à l'émission. L'étude d'un large échantillon de galaxies dominées par des starbursts et/ou AGNs devrait permettre de définir un nouveau diagnostic en utilisant le rapport $\text{UIB}(3.3\ \mu\text{m})/\text{Continuum}(3.3\ \mu\text{m})$ (i.e. la largeur équivalente). Cette technique offre l'avantage de pouvoir définir proprement le continuum sous-jacent de l'UIB. Néanmoins, elle suppose que le continuum ne soit pas absorbé à $3.3\ \mu\text{m}$ par le tore optiquement épais observé par la tranche dans les AGNs obscurcis (Seyfert 2).

- L'imagerie dans l'infrarouge moyen grâce à ISAAC et VISIR sur le VLT devrait être capable de révéler des structures habituellement obscurcies en optique et infrarouge proche jusqu'à $2.2\mu\text{m}$. En particulier, l'observation de la poussière en émission est très efficace pour repérer les structures enfouies comme les barres ou anneaux nucléaires dont on pense qu'ils devraient être reliés à l'alimentation des AGNs.
- Sur un plan théorique, l'ensemble de ces données comme le spectre de NGC 1068 devraient permettre de mieux contraindre les modèles de poussières dans les régions actives et en particulier l'émission associée au tore moléculaire chauffé par le rayonnement primaire de l'AGN.
- Dans un futur plus lointain, le successeur du HST dans l'infrarouge, le NGST, sera optimisé pour sonder les galaxies lointaines au moins jusqu'à $5\mu\text{m}$ avec une résolution spatiale d'environ $0.1''$. Grâce à un tel pouvoir de séparation, il deviendra possible de se soustraire du problème de dilution du continuum de l'AGN provenant des régions circum-nucléaires de formation d'étoiles.

La distribution spectrale d'énergie des galaxies actives ou starbursts atteignant son maximum dans l'infrarouge lointain, il est nécessaire d'observer au-delà de l'infrarouge moyen. Le satellite FIRST ("Far Infrared Space Telescope") programmé pour être lancé en 2007 devrait nous permettre d'accéder à ce domaine de longueur d'onde entre 85 et $700\mu\text{m}$. La résolution spatiale de l'ordre de $9''$ à $125\mu\text{m}$ est donnée par la limite de diffraction du miroir primaire d'un diamètre de 3.5 mètres. La cartographie dans l'infrarouge lointain du contenu en poussières froides des galaxies proches permettra de déterminer précisément la distribution spectrale d'énergie dans les régions centrales et dans le disque de la galaxie et de comparer celle-ci avec l'émission de la poussière chaude obtenue avec ISO et SIRTf.

Cinquième partie

Annexe

Annexe A

L'instrument ISOCAM

Le satellite ISO ("Infrared Space Observatory") a fonctionné entre novembre 1995 et mai 1998. Il regroupe 4 instruments (2 spectromètres: ISOSWS et ISOLWS, 1 photomètre ISOPHOT et 1 caméra ISOCAM) couvrant les longueurs d'onde comprises entre 2.5 et 240 μm (voir la Figure A.1). Le miroir primaire a un diamètre de 60 cm et l'ensemble de l'instrumentation est refroidi par un cryostat à hélium liquide aux alentours d'une température de 3 K (Kessler et al., 1996).

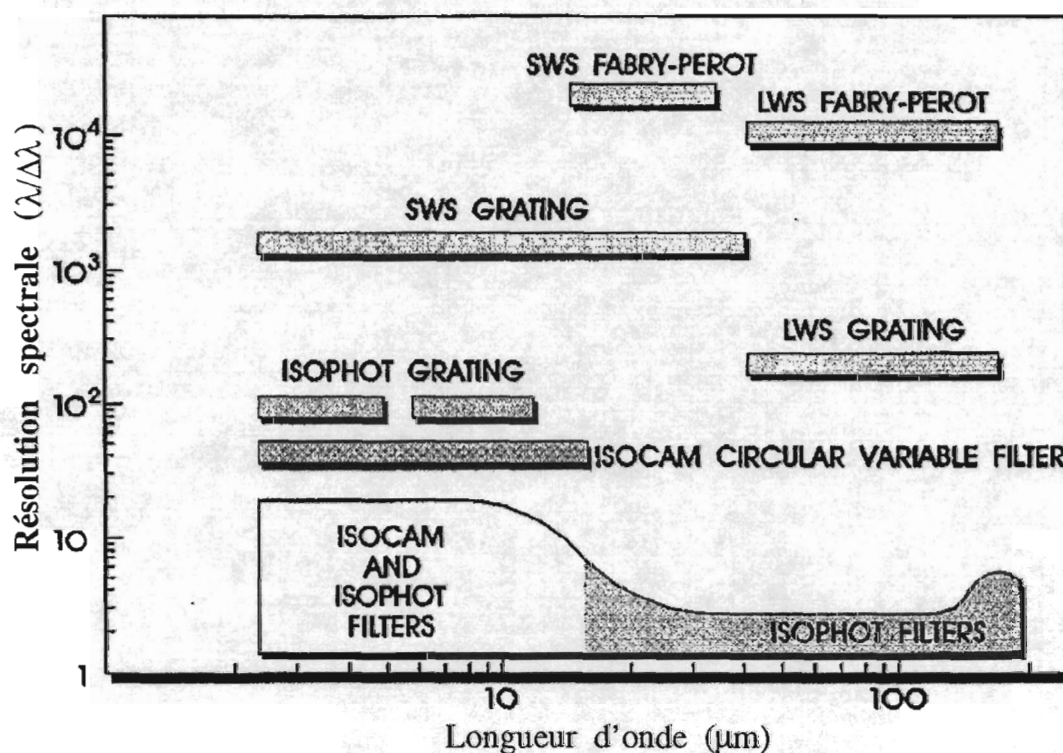


FIG. A.1 – Capacités photométriques et spectroscopiques des différents instruments à bord d'ISO. ISOCAM permet de faire de l'imagerie avec un large éventail de filtres larges. De plus, une succession de filtres étroits ("Circular Variable Filters" ou CVF), couvrant continûment l'intervalle de 2.5 à 17 μm , permet de faire de la spectro-imagerie avec une résolution spectrale moyenne de $\lambda/\Delta\lambda = 40$.

Le schéma optique de l'instrument représenté sur la figure A.2 se distingue par l'utilisation de deux voies indépendantes dédiées aux détecteurs à courtes longueurs d'onde SW($2.5-5\mu\text{m}$) à gauche et à grandes longueurs d'onde LW($5-17\mu\text{m}$) à droite (voir la légende pour plus de détails).

Dans le tableau A.1, nous avons récapitulé l'ensemble des filtres permettant d'observer dans la bande 2.5 à $17\mu\text{m}$, grâce aux détecteurs SW(matrice à injection de charges de 32×32 pixels en In:Sb) et LW(matrice photoconductrice de 32×32 pixels en Si:Ga) (Cesarsky et al., 1996a).

Le champ d'observation va dépendre directement du champ de vue par pixel donné par la roue à lentilles mais aussi du miroir de Fabry qui délimite la taille du faisceau réfléchi sur une des deux voies (voir tableau A.2). Le petit et le grand miroir de Fabry donnent respectivement un champ de vue de $87''\times 87''$ et de $3.3'\times 3.3'$. Les petits champs de vue par pixel ("pixel field of view" ou PFOV) de $1.5''$ et de $3''$ diminuent donc le champ de vue effectif délimité par la taille du détecteur.

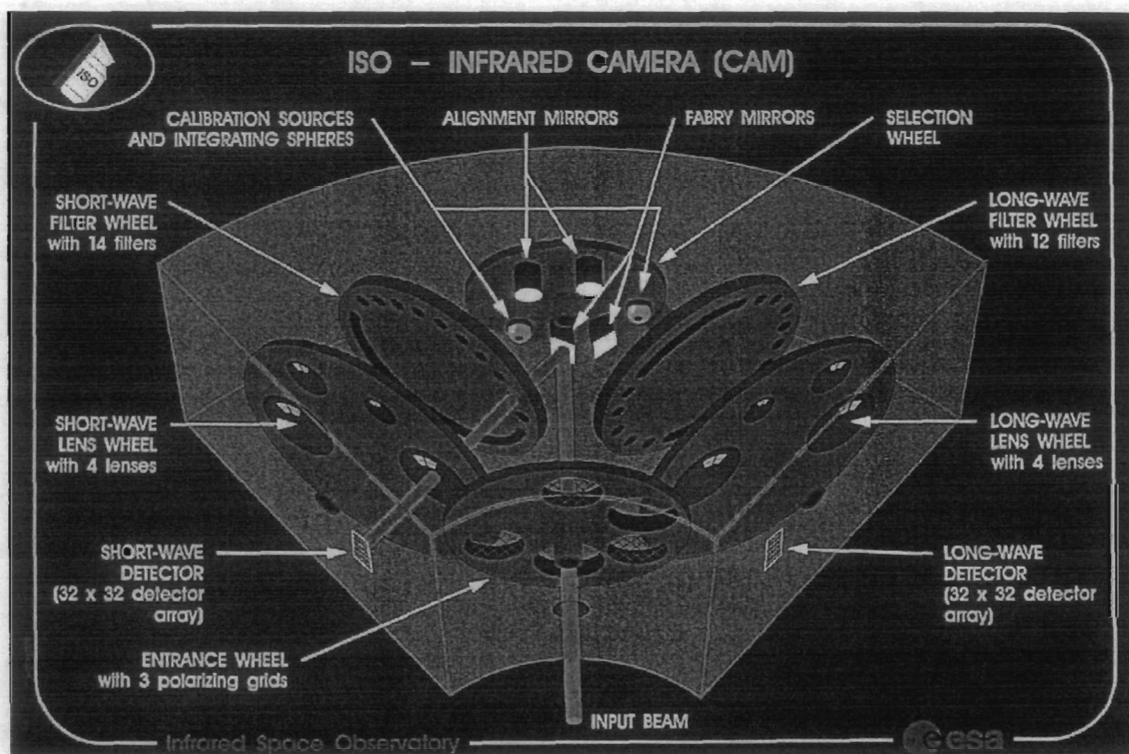


FIG. A.2 – Schéma optique d'ISOCAM: Le faisceau lumineux arrive par la roue d'entrée (en bas) composée de 2 trous et de 3 polariseurs. La roue de sélection (en haut) contient 4 miroirs de Fabry (1 grand + 1 petit pour chaque détecteur) ainsi que deux sources de calibration pour LW et SW. Ensuite, le faisceau peut empreinter deux chemins différents en fonction du détecteur choisi. Pour chaque voie, il passe en premier par la roue à filtres (composée de filtres larges et de filtres continûment variables de formes circulaires). Ensuite, la roue à lentilles permet de sélectionner le champ de vue par pixel ($1.5''$, $3''$, $6''$ ou $12''$). Le signal lumineux arrive enfin sur le détecteur choisi.

TAB. A.1 *Propriétés des filtres ISOCAM.*

Filtres	Centre	Intervalle	$\lambda/\Delta\lambda$	Intérêt scientifique
SW1	3.57	3.05-4.10	3	Filtre proche de L
SW2	3.30	3.20-3.40	17	UIB (3.28 μm)
SW3	4.50	4.00-5.00	5	Général-Commun avec LW1
SW4	2.77	2.50-3.05	5	Général
SW5	4.25	3.00-5.50	2	Grande sensibilité
SW6	3.72	3.45-4.00	7	Comparaison pour SW7 = filtre L
SW7	3.05	2.90-3.20	10	H ₂ O
SW8	4.06	3.93-4.20	33	Br α
SW9	3.88	3.76-4.00	20	Comparaison pour SW8
SW10	4.70	4.53-4.88	13	CO
SW11	4.26	4.16-4.37	20	CO ₂
CVF SW	2.273-5.122	0.054-0.125	41	
LW1	4.50	4.00-5.00	5	Général-Commun avec SW3
LW2	6.75	5.00-8.50	2	Général-UIBs
LW3	15.0	12.0-18.0	3	Grande sensibilité-Continuum
LW4	6.00	5.50-6.5	6	UIB
LW5	6.75	6.50-7.00	14	Comparaison pour LW4
LW6	7.75	7.00-8.50	5	UIB(7.7 μm)-Comparaison pour LW7
LW7	9.62	8.50-10.7	4	Bande des silicates
LW8	11.4	10.7-12.0	9	UIB(11.3 μm)
LW9	15.0	14.0-16.0	8	Général-Continuum
LW10	11.5	8.00-15.0	2	Bande IRAS à 12 μm
CVF1 LW	4.956-9.583	0.134-0.220	37-43	
CVF2 LW	9.003-16.52	0.258-0.336	35-51	

TAB. A.2 – *Les différents champs de vue avec ISOCAM.*

PFOV	Miroir de Fabry	Champs
1.5''	petit	45'' \times 45''
3''	petit	87'' \times 87''
3''	grand	96'' \times 96''
6''	grand	3.2' \times 3.2'
12''	grand	3.3' \times 3.3'

Annexe B

Réduction des données ISOCAM

Dans cette annexe, nous allons exposer brièvement les différentes étapes de réduction de données utilisées pour les galaxies de la proposition CAMACTIV ainsi que différentes techniques de traitement du signal appliquées aux données ISOCAM (Siebenmorgen et al., 1998). Ces galaxies proches étant intrinsèquement très lumineuses en infrarouge, les données ont un bon rapport signal sur bruit (au moins pour les régions nucléaires). Un traitement standard peut être appliqué sur les données (Starck et al., 1999). Chaque étape de la réduction va être illustrée sur la galaxie NGC 1068 observée en mode CVF. Cette galaxie a l'avantage de présenter des spectres très différents ("AGN", "starbursts") dans le même champ d'observation ($96'' \times 96''$) avec un grand contraste en intensité entre le noyau et les régions étendues.

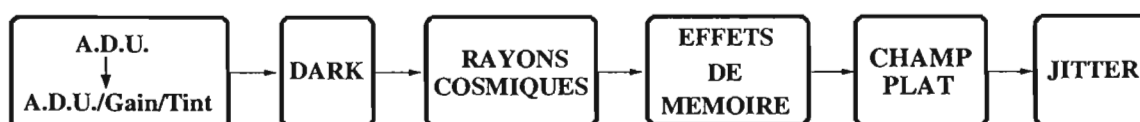


FIG. B.1 – Les différentes étapes de réduction des données ISOCAM pour les galaxies de notre échantillon. A noter que la correction de la distorsion du champ de vue est appliquée seulement dans le cas des cartes mosaïques faites en filtres larges ("raster") avec des champs de vue par pixel de $3''$ ou $6''$. Les termes anglais "dark" et "jitter" signifient respectivement "courant d'obscurité" et "mouvements de tremblement incontrôlés" du satellite.

B.1 Normalisation des données en ADU/Gain/Tint.

Dans un premier temps, on normalise les données brutes qui sont en A.D.U. ("analog-to-digital units" ou unités analogiques à digitales) en divisant l'ensemble des images individuelles ("frames") par le gain (1,2 ou 4) et le temps d'exposition ($T_{int} = 0.28, 2.1, 5.04, 6.02, 10.08, 20.16$ ou 60.2 s). Pour certaines observations, nous devons diviser aussi par le nombre de "frames" accumulées à bord du satellite ($N = 4$ pour $T_{int} = 0.28$ s et $N = 12$ en mode parallèle). Cette opération très simple est effectuée en même temps que la correction du courant d'obscurité exposée dans la section suivante.

B.2 Soustraction du courant d'obscurité ("dark").

Le courant d'obscurité se traduit par de fortes trames sur les lignes paires-impaires supérieures au bruit de lecture et de photons. Nous avons utilisé les modèles de "darks" obtenus à partir de calibrations effectuées pendant différentes révolutions. Ces darks ont ensuite été corrigés des dérives temporelles (Biviano et al., 1998b). Cette méthode fournit une estimation du "dark" pour une révolution et un temps donnés, ce qui permet son optimisation à chaque instant pour des observations de plusieurs heures avec les CVFs ou les grandes mosaïques (voir Fig. B.2).

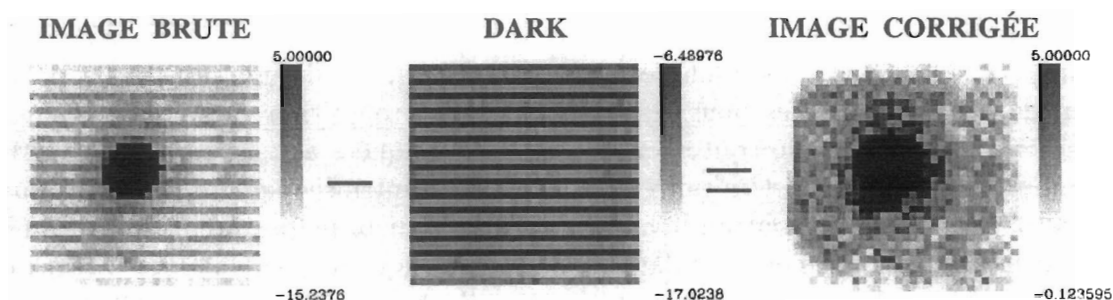


FIG. B.2 – Correction du "dark" sur la première "frame" du CVF de NGC 1068 ($16.33\mu\text{m}$) en utilisant le modèle d'évolution temporelle (Biviano et al., 1998b).

B.3 Correction des rayons cosmiques

Les rayons cosmiques (appelés aussi "glitches" en anglais) interagissent avec le détecteur en produisant des pics d'intensité. Ils ont la plupart du temps une très courte durée cependant certains d'entre eux peuvent affecter le détecteur sur une longue période à cause de l'effet de mémoire (cf. paragraphe suivant). On peut les classer en trois catégories (Claret, 1999):

- A: Classique - Glitches à courte durée sans effet de mémoire.
- B: "Fader" - Glitches à effet de mémoire avec une diminution exponentielle de l'intensité après le pic.
- C: "Dipper"- Glitches à courte durée suivis d'une queue négative à remontée exponentielle.

Nous avons utilisé un traitement basé sur une analyse temporelle en multi-résolution (Starck et al., 1999). Le signal provenant d'une source observée avec un temps d'exposition suffisamment important peut ainsi être distingué des glitches parasites qui affectent le détecteur sur une très courte durée. Cette étape du traitement est illustrée sur la figure B.3 qui représente l'évolution temporelle du pixel (15,22) en mode CVF sur une région de formation d'étoiles de NGC 1068.

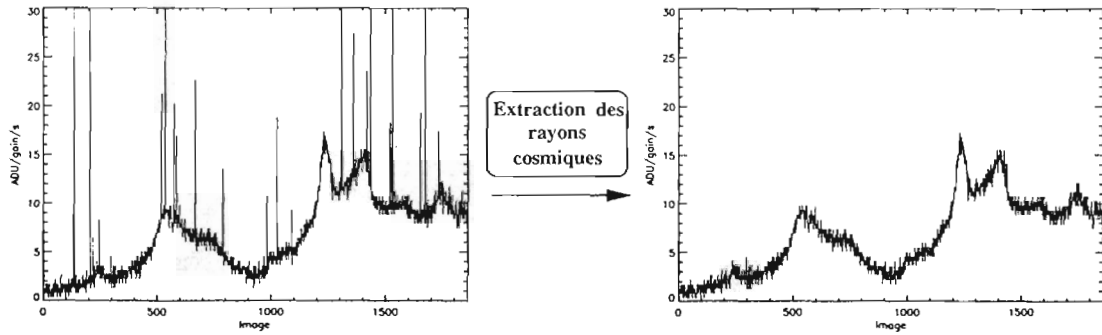


FIG. B.3 – *Extraction des pics d'intensité dus aux rayons cosmiques avec un filtrage utilisant les méthodes de multirésolution développées par Starck et al., 1999. La courbe représente l'évolution en ADU/gain/s en fonction des longueurs d'onde croissantes du pixel (15,22). A gauche, on présente les données juste après la correction du courant d'obscurité, et à droite juste après la correction des rayons cosmiques. On peut noter que seules les structures très piquées provenant des "glitches" sont soustraites en ne laissant que le signal caractérisé par les bandes infrarouges non identifiées et le continuum des petits grains.*

La méthode est robuste et s'applique sur des données non stabilisées en flux. Cependant, le mode d'observation avec les CVFs rend plus difficile son utilisation à cause de la courte durée d'intégration pour chaque longueur d'onde (12 expositions de 2s ou 5s en moyenne). On a utilisé deux niveaux de soustraction des rayons cosmiques ("glitches"); une pour les longs et intenses "glitches" (échelle = 4, $\sigma = 5$) et une autre pour les courts et plus faibles "glitches" (échelle = 3, $\sigma = 3$). Cette méthode nous permet de soustraire facilement les "glitches" de types A. Cependant, les "glitches" présentant un effet de mémoire (types B ou C) peuvent ne pas être complètement soustraits, on doit retirer manuellement les résidus associés à ces "glitches". A noter, que l'effet de tremblement du satellite ("jitter") sur des sources très intenses peut aussi créer des variations artificielles très rapides de flux similaires à des "glitches". Cet effet est très spectaculaire sur les noyaux de galaxies et en particulier sur NGC 1068. Dans ce cas, on doit vérifier manuellement la zone affectée par ces "faux glitches".

B.4 Effets de mémoire

La réponse du détecteur LW(5-17 μm) à un flux donné à un instant t n'est pas instantanée et dépend fortement du flux reçu précédemment. Cet effet (très similaire à la persistance rétinienne) est nommé "effet de mémoire" ou "transitoire". Plusieurs méthodes ont été développées pour corriger cet effet. Certaines sont basées sur des "fits" de modèles exponentiels (Delattre, 1996), d'autres ne tiennent compte que des images proches de la stabilisation (en masquant les images de début). Ces techniques ne peuvent être appliquées que pour des mosaïques où le nombre d'images par position est important (~ 40). Dans le cas des observations CVFs (~ 12 images par longueur d'onde), de meilleures corrections sont utilisées. Elles n'utilisent pas de "fit" mais un

modèle "empirique" décrivant la réponse temporelle du détecteur (méthode IAS, Abergel et al., 1998) ou "physique" (méthode Fouks-Schubert, Fouks and Schubert, 1995; Coulais and Abergel, 1998). La première méthode développée donne une précision de $\sim 10\%$ alors que la dernière méthode basée sur un modèle physique de détecteur (SI:Ga) va jusqu'à une précision de l'ordre du pourcent sur des sources étendues. L'ensemble des données a été traité initialement avec la méthode IAS. En effet, notre échantillon est composé de sources ponctuelles intenses dans la plupart des cas, ce qui limite l'intérêt de la méthode Fouks-Schubert (la méthode ne corrige pas du couplage de charges entre pixels voisins). On peut voir l'effet de la correction sur le spectre d'une région extranucléaire de NGC 1068. On note que les deux corrections réduisent la largeur des bandes et des raies tout en augmentant leurs pics. On remarque aussi que le continuum à $5-6\mu\text{m}$, est diminué significativement. Finalement, il n'y a pas de différences notables ($< 10\%$) entre les deux corrections.

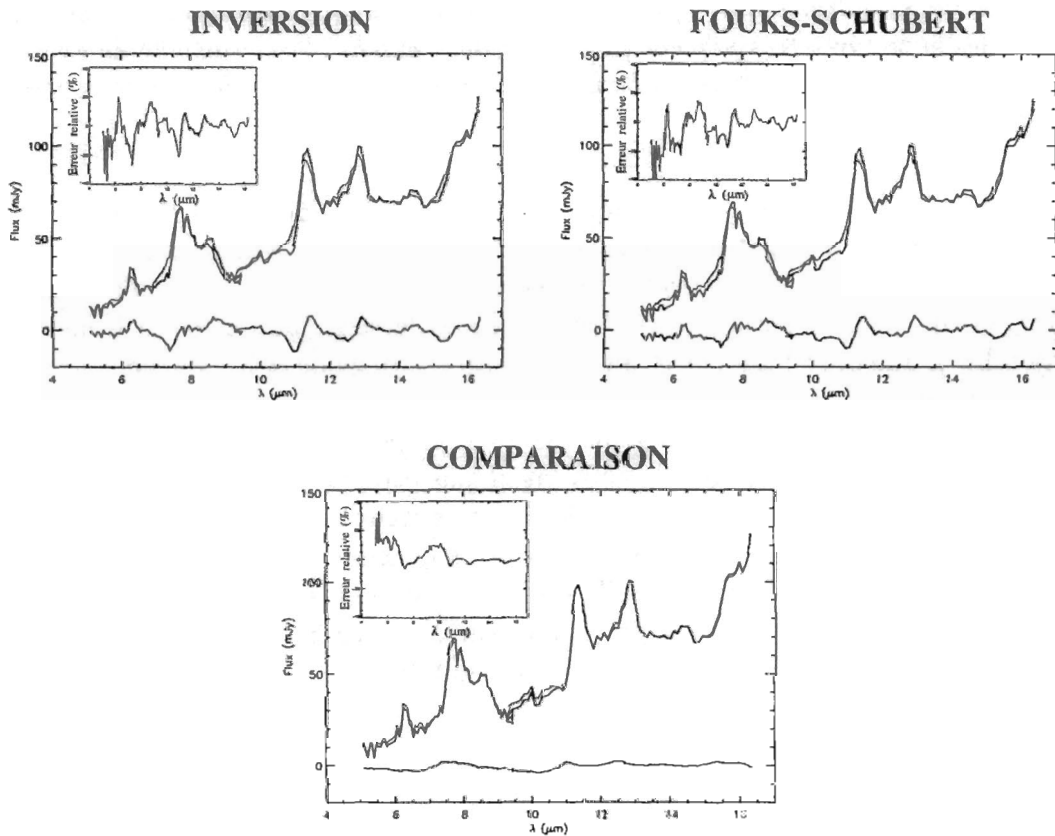


FIG. B.4 – A gauche en haut: Evolution temporelle en flux du pixel (15,22) avant (trait fin) et après (trait épais) la correction de la stabilisation par la méthode d'inversion (Abergel et al., 1998). A droite en haut: Comparaison avec la méthode de Fouks-Schubert en trait épais (Fouks and Schubert, 1995; Abergel and Coulais, 1998, Coulais and Abergel, 1998). En bas, on peut noter la similarité des deux méthodes (Fouks-Schubert en trait épais et Inversion en trait fin).

B.5 Correction du champ plat

La correction du champ plat ("flat field" en anglais) a été effectuée à partir des données de calibration prises durant différentes révolutions (Biviano et al., 1998a). Dans les fichiers de calibration, le champ plat est divisé en champ plat optique et en champ plat détecteur, le produit des deux donnant le flat total utilisé (voir Fig. B.5). Cependant, il existe un décalage d'une colonne ("flat" gauche ou droit) probablement dû aux deux miroirs Fabry de l'instrument qui rend difficile l'utilisation des flats de calibration pour toutes les observations. Dans certains cas, on peut ainsi construire un flat à partir des données pour de larges mosaïques contenant des sources ponctuelles. On prend en compte le fait, qu'un pixel donné regarde la majorité du temps le fond et non la source. Malheureusement, ce type de flat n'est pas applicable aux petites mosaïques (2×2) et aux CVFs de notre échantillon.

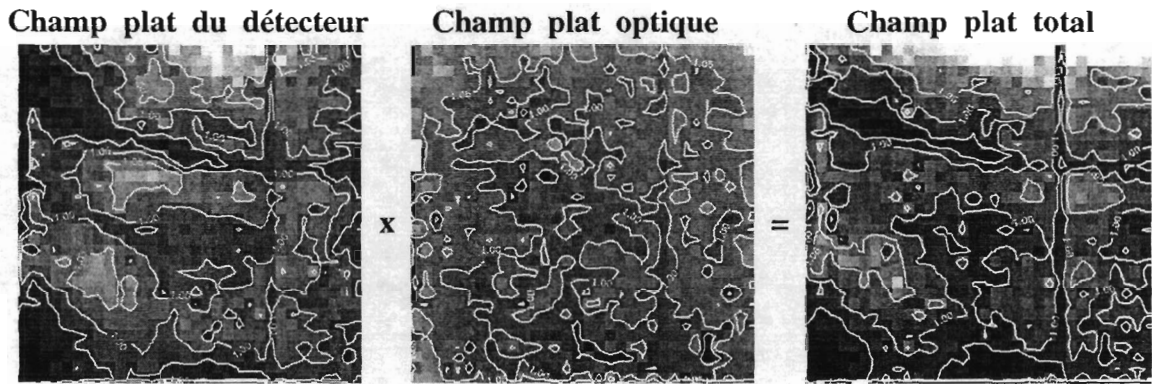


FIG. B.5 – *Champ plat ("flat") de calibration obtenu pour le filtre LW3. A gauche, on a représenté le flat du détecteur correspondant à un champ de vue par pixel de $1.5''$. Au milieu, le "flat" optique correspond à un champ de vue par pixel de $3''$. A droite, le "flat" total s'obtient en multipliant le "flat" du détecteur avec celui en optique.*

B.6 Correction du "jitter"

Le "jitter" causé par le mouvement incontrôlé du satellite produit un déplacement de la source sur le détecteur. La précision relative du pointage est d'environ $0.5''$ (Gastaud, 1999). Pour corriger du "jitter" dans le cas d'objets ponctuels (la plupart de nos observations en contiennent), nous avons estimé la position en X-Y sur le détecteur de la source en utilisant les fonctions théoriques d'étalement de point pour un objet ponctuel ("PSF ou Point Spread Function") qui sont échantillonnées à $1/20$ de pixels près en position. Nous obtenons ainsi la carte du "jitter" (voir un exemple Fig. B.6). A partir de ces déplacements en X et en Y, on reprojette l'ensemble des images en incluant le "jitter". La plupart du temps, l'effet obtenu est négligeable. Cependant, pour le noyau de NGC 1068, la correction est nécessaire comme on peut le voir sur la figure B.7 et figure B.8. Outre l'effet du "jitter", on peut avoir aussi un déplacement plus grand (1 pixel) entre les deux sections du CVF (voir Table B.1).

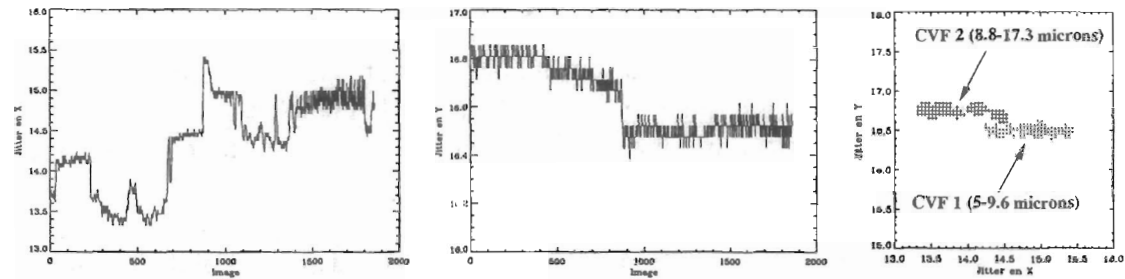


FIG. B.6 – Evolution de la position du pic d'intensité pour la galaxie NGC 1068 en fonction de l'axe X (à gauche) et de l'axe Y du détecteur (au milieu). La position du pic pour chacune des 1860 imagerie du CVF a été estimée à partir des PSFs théoriques positionnées à 0.05 pixels près. A droite, on peut voir la distribution en position de l'objet ponctuel sur le détecteur. On distingue deux régions très nettement séparées provenant de chaque secteur du CVF, à savoir le CVF1 de 5 à 9.6 μm , et le CVF2 de 8.8 à 17.3 μm .

TAB. B.1 – Caractéristiques du "jitter" pour NGC 1068.

	moyenne(x)	sigma(x)	moyenne(y)	sigma(y)
CVF 1	14.75	0.27	16.51	0.04
CVF 2	13.86	0.38	16.77	0.06

Note : Ces valeurs sont exprimées en pixel (1 pixel = 3"). On obtient $\sigma \simeq 1''$ en X et $\sigma \simeq 0.15''$ en Y avec un déplacement important entre les deux secteurs du CVF de 3" selon l'axe X.

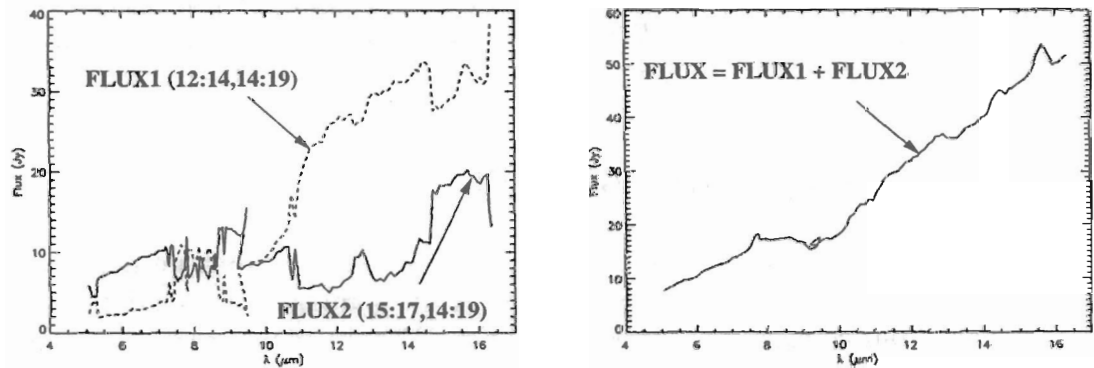


FIG. B.7 – Effet du "jitter" sur la répartition du flux sur le détecteur. La figure de gauche montre le flux en Jansky (Jy) reçu dans deux boîtes rectangulaires adjacentes prises au centre de l'image caractérisant la région centrale de la galaxie dominée par le noyau actif. On remarque l'aspect antisymétrique des deux spectres témoignant du déplacement d'une part importante du flux d'une région à l'autre. A droite, le spectre correspond à l'addition des deux spectres précédents.

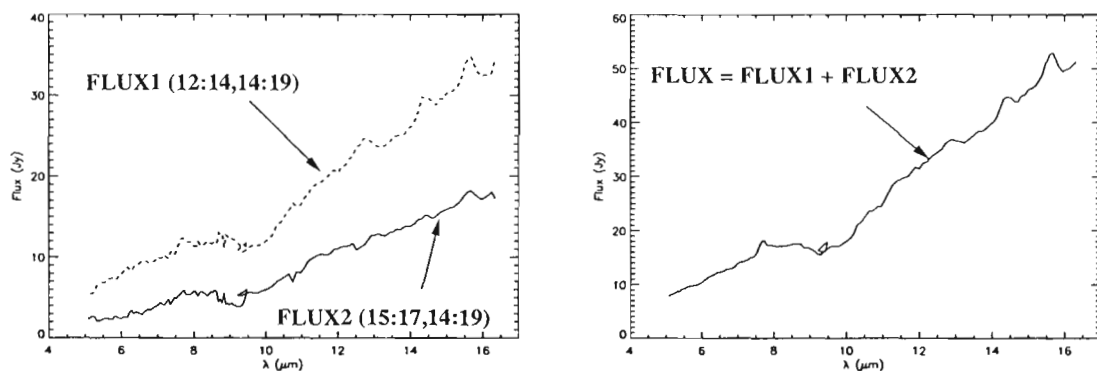


FIG. B.8 – Correction du “jitter”. A partir de l’estimation du “jitter” montrée dans la figure B.6, nous avons centré chaque imagerie en les sur-échantillonnant et en les déplaçant du décalage correspondant. Bien que la méthode ne soit pas parfaite, nous voyons bien l’effet de la redistribution du flux dans chaque région (spectres de gauche) tout en conservant le même flux total (spectre de droite).

B.7 Déconvolution spatiale

Toute image prise avec un instrument optique (le télescope ISO est composé d’un miroir primaire, secondaire et de plusieurs filtres et lentilles) est affectée par la diffraction du front d’onde provenant de la source observée. On définit la réponse de l’instrument par sa fonction de transfert pour une source ponctuelle (PSF ou “Point Spread Function”) notée P . L’image reçue sur le détecteur $I(x,y)$ correspond à la convolution spatiale de l’objet noté O par P . On ajoute le bruit imputable à toute mesure physique sur le détecteur $N(x,y)$.

$$I(x,y) = (O * P)(x,y) + N(x,y)$$

Le but de la déconvolution est de déterminer $O(x,y)$ à partir de $I(x,y)$ et $P(x,y)$ que l’on connaît. Ce problème inverse appelé déconvolution (spatiale dans ce cas) est confronté à deux problèmes majeurs:

- Le détecteur contient un nombre de pixel limité, ainsi l’échantillonnage spatial de la PSF est limité. Cela se traduit par le fait que l’on a une coupure aux hautes fréquences spatiales de la PSF.
- Le bruit introduit des artefacts durant la déconvolution.

Il en résulte qu’il n’y a pas une unique solution qui minimise la norme du résidu égale à $\|I(x,y) - (O * P)(x,y) + N(x,y)\|$. On est obligé d’ajouter d’autres contraintes qui minimisent les solutions possibles (le flux doit être positif, les sources sur l’image doivent être au moins aussi larges que la PSF et au-dessus d’un certain niveau de bruit,...). Ces différentes méthodes de régularisation s’appliquent très bien à l’approche multi-résolution par ondelettes développée par Starck et al., 1998.

Parmi l'ensemble des algorithmes de déconvolution à notre disposition qui utilisent la régularisation multi-échelles, nous avons appliqué la méthode de Lucy-Richardson (par défaut dans "mr_deconv"). Cependant, le détecteur d'ISOCAM ne possède que 32×32 pixels ce qui produit des images avec un faible échantillonnage. D'après le théorème de Shannon, l'échantillonnage donné par la taille du pixel doit être environ égale à 2 fois la largeur à mi-hauteur (FWHM) de la PSF. On peut voir sur la figure B.9 que la condition n'est parfaitement remplie que pour les filtres LW3, LW7, LW8, LW9 et LW10 à $1.5''/\text{pixel}$.

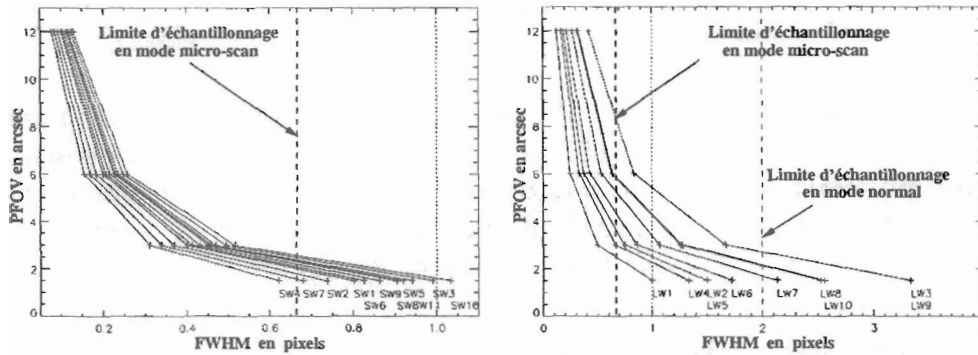


FIG. B.9 – Variation de la largeur à mi-hauteur en fonction ("FWHM") du PFOV et de la longueur d'onde définie par les différents filtres (cf. le rapport sur les PSFs d'ISOCAM, Okumura, 1998). La limite de Shannon admise habituellement en imagerie est de 2 pixels par "FWHM" pour un échantillonnage correcte. En-dessous de cette limite, les images sont sous-échantillonnées. En fait, on perd en résolution par rapport à la limite de diffraction.

Pour l'ensemble des autres filtres, on doit augmenter l'échantillonnage soit de façon artificielle ("rebin") soit en utilisant la méthode du "micro-scan" qui consiste à se déplacer à chaque position d'une fraction de pixel pour restorer une carte mosaïque. Les "PSFs" de calibrations ont été ainsi faites en mode "micro-scan" de $1/3$ de pixel ce qui augmente par 3 l'échantillonnage (exemple sur la figure B.10).

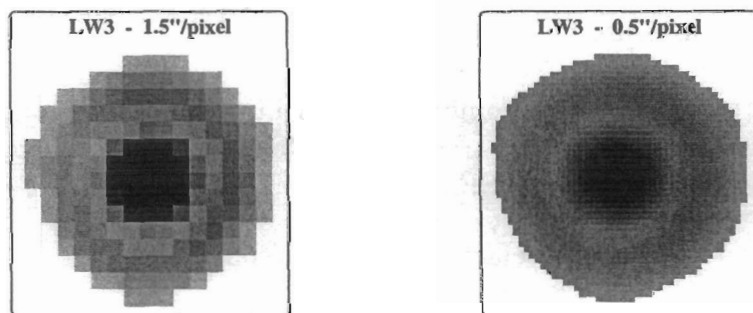


FIG. B.10 – Illustration du mode microscan. A gauche, on a représenté la PSF pour LW3 avec le meilleur échantillonnage possible de la caméra, i.e. $1.5''/\text{pixel}$. A droite, le mode microscan de la caméra a été utilisé pour obtenir une PSF avec un meilleur échantillonnage ($0.5''/\text{pixel}$).

Cela permet d'inclure les filtres à 3'' de LW aussi (sauf LW1) dans la limite correcte. Néanmoins, on reste largement sous-échantillonné à 6'' et 12'' pour LW et surtout pour SW. Pour utiliser la déconvolution, il est nécessaire de partir d'images bien échantillonnées. Pour cela, on peut utiliser des méthodes de rebin sur l'image. Une première application est montrée sur la figure B.11 où l'on a reproduit deux sources ponctuelles séparées par 3'' avec un échantillonnage de 1.5''/pixel. Nous avons pris deux PSFs séparées par 3'' (2 pixels à 1.5''). Ces deux sources ne sont pas résolues par ISOCAM même après déconvolution (figure du haut). Bien que l'échantillonnage soit suffisant avant déconvolution, il devient trop faible sur l'image déconvoluée où l'on ne peut distinguer les deux pics (Magain et al., 1998). On peut pallier à ce problème en augmentant le nombre de pixels définissant la PSF, soit de façon artificielle en interpolant (figure du milieu), soit en utilisant la PSF microscan (figure du bas). On peut ainsi résoudre les deux sources après la déconvolution. Le flux est conservé sur l'image intégrée mais également individuellement pour les deux sources (à 5% près dans une boîte de 7×7 pixels centrée sur chaque pic, soit 3.5''×3.5''). La déconvolution avec un sur-échantillonnage permet ainsi de séparer nettement les deux pics qui ne l'étaient pas avec le PFOV initial.

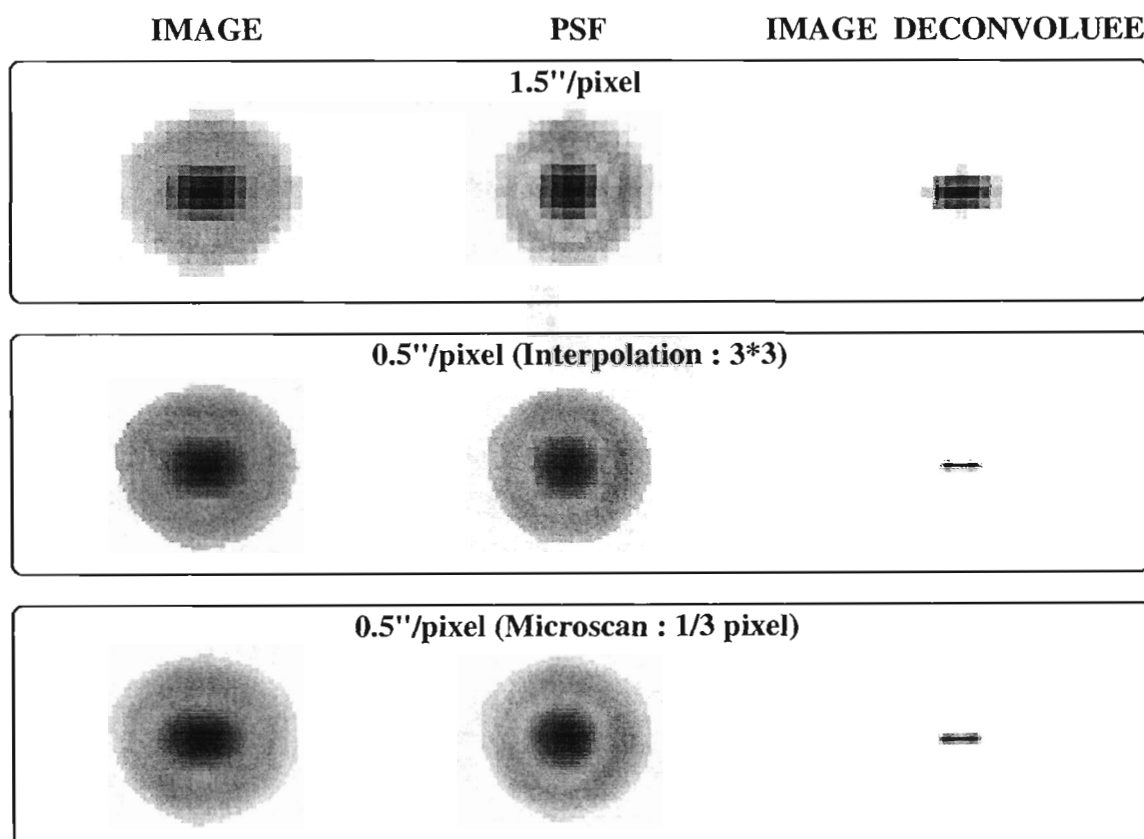


FIG. B.11 – Déconvolution d'un modèle composé de deux sources ponctuelles séparées de 3''. De haut en bas, on déconvolue respectivement sans changer l'échantillonnage, en sur-échantillonnant l'image et la PSF pour finir en sur-échantillonnant uniquement l'image.

Sur la figure B.12, on peut comparer les différents résultats obtenus en déconvoluant des données observées à $1.5''/\text{pixel}$ de la source IRAS14348-1447. C'est un système comprenant deux galaxies en interaction séparées de $4''$. L'observation ISOCAM a été faite avec un PFOV de $1.5''$ ce qui permet de résoudre les deux galaxies à courtes longueurs d'onde avec LW2 ($7\mu\text{m}$) mais elles restent non-résolues à $15\mu\text{m}$, avec LW3. La déconvolution permet de les séparer (2 pics distincts) en utilisant une carte LW "rebinnée" à $0.5''/\text{pixel}$ avec les PSFs de calibration en mode micro-scan ($0.5''/\text{pixel}$). A gauche, on montre le résultat avec LW2 et à droite celui avec LW3.

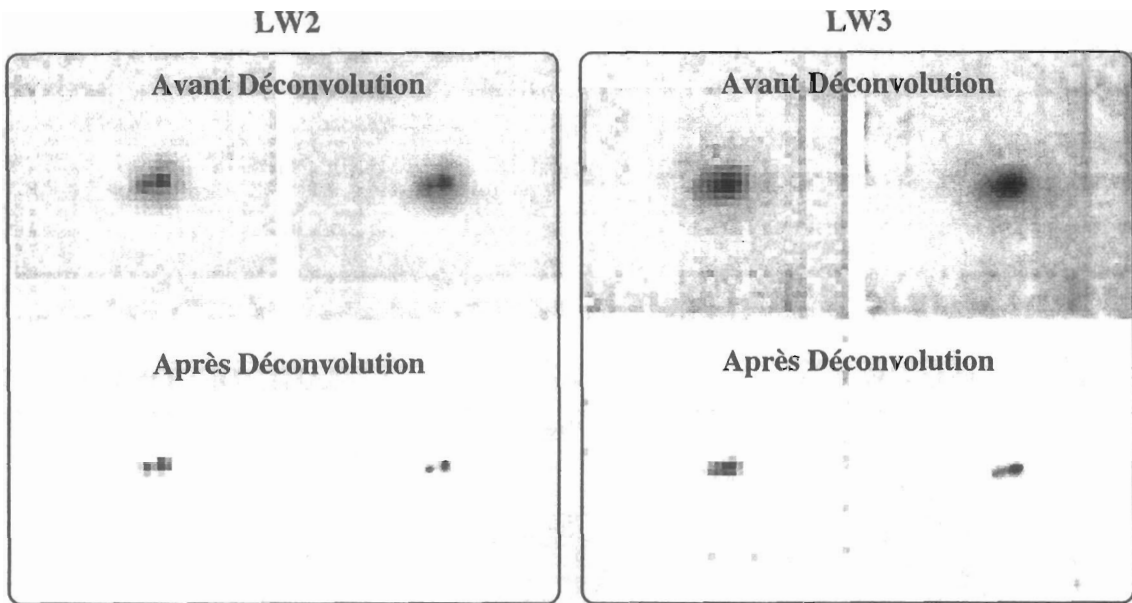


FIG. B.12 – Déconvolution de IRAS 14348-1447 observée au travers deux filtres larges LW2 ($7\mu\text{m}$) et LW3 ($15\mu\text{m}$) en utilisant le sur-échantillonnage avec les PSFs observées en mode micro-scan.

La déconvolution est aussi très utile au niveau photométrique pour séparer deux sources proches qui sont chacune contaminées par l'anneau d'Airy de la source voisine. Comme dans le cas NGC 1068, certains noyaux de galaxies (avec des "AGNs") sont très lumineux et de ce fait, contaminent fortement les régions proches au niveau du disque d'Airy bien au-delà de la largeur à mi-hauteur. Par conséquent, le flux des régions périphériques ("starburst") est contaminé par le noyau. La déconvolution permet non-seulement de séparer spatialement ces régions mais aussi d'obtenir une meilleure estimation de leur flux.

Sur la figure B.13, nous montrons un exemple de déconvolution sur NGC 1068 dans le but de séparer les deux bras spiraux entourant le noyau de la galaxie. Dans ce cas, on devrait pouvoir nettement séparer l'anneau d'un rayon d'environ $13''$ ce qui est bien supérieur à la limite de résolution de $6''$. Néanmoins, la brillance de surface du noyau est telle qu'il contamine les régions faibles jusqu'à une distance supérieure à l'anneau d'Airy de $9''$ de rayon à $15\mu\text{m}$. La déconvolution élimine l'effet de l'anneau d'Airy tout en conservant le flux (dans au moins une boîte 3×3 pixels).

Sur la figure B.14, nous pouvons voir le profil selon l'axe Y de NGC 1068. L'anneau

correspond bien à des régions déjà observées à d'autres longueurs d'onde et n'est donc pas a priori un artefact. On peut en effet voir une extension par rapport aux PSFs avant de déconvoluer. De plus, les spectres dans chaque région se distinguent très nettement en caractérisant le noyau et les régions de formation d'étoiles.

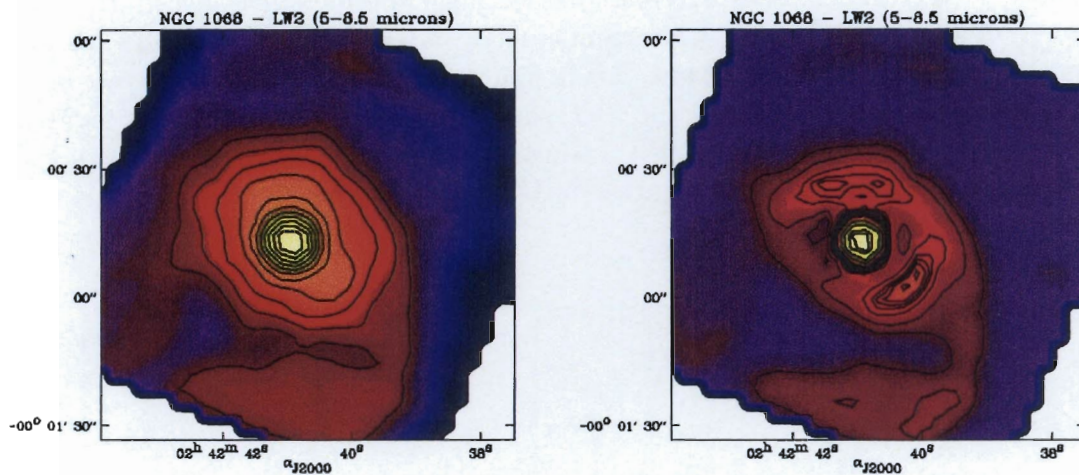


FIG. B.13 – Déconvolution de NGC 1068 à $7\mu\text{m}$ (LW2) avec une PSF expérimentale. A gauche, on a représenté l'image avant déconvolution où l'on distingue une faible asymétrie autour du pic central qui domine l'émission. A droite, on a l'image déconvoluée avec le noyau au centre ainsi que l'anneau de formation d'étoiles à l'extérieur. La déconvolution a été effectuée avec l'échantillonnage initial de $3''/\text{pixel}$. On obtient un résultat similaire avec une interpolation 3×3 donnant $1''/\text{pixel}$.

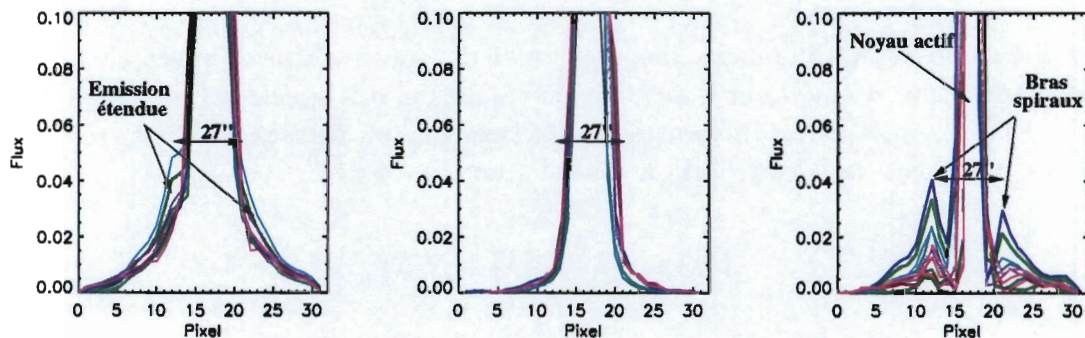


FIG. B.14 – Profils selon l'axe Y du détecteur centrés sur le noyau de NGC 1068. On a utilisé une bande suffisamment grande de 5 pixels ($15''$) ce qui permet de négliger l'effet du "jitter". Chaque courbe correspond à des filtres larges équivalents (de LW2 à LW10, LW1($4-5\mu\text{m}$) est en dehors du CVF) couvrant l'étendue spectrale du CVF. A gauche, on a représenté le profil avant déconvolution. Au milieu, on a le profil des PSFs expérimentales utilisées. A droite, la déconvolution (Algorithme de Lucy régularisé par les ondelettes) a été appliquée sur chaque image, et l'on peut distinguer la présence de deux pics de chaque côté du noyau.

B.8 Déconvolution spectrale

La fonction de transfert spectrale du CVF est nettement mieux échantillonnée que celle au niveau spatial définie auparavant. En effet, la largeur à mi-hauteur de chaque courbe de transfert à chaque longueur d'onde varie de 2 à 7 pixels avec une moyenne à 3.5 pixels (le pixel ici signifie l'intervalle en longueur d'onde entre deux filtres). Sur la figure B.15 à gauche, on voit nettement un recouvrement spectral entre les deux secteurs CVFs aux environs de $9.3 \mu\text{m}$. Sur la figure B.15 à droite, quelques courbes de transmission de chaque filtre étroit du CVF sont représentées et mettent en évidence le large recouvrement des fonctions de transfert. A noter aussi, que l'espacement entre les filtres augmente dans la seconde partie du CVF à grande longueur d'onde ainsi que la largeur des filtres.

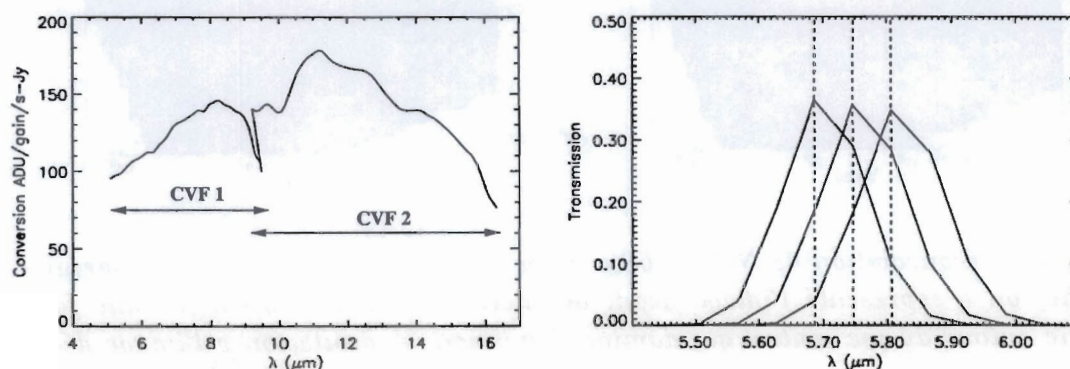


FIG. B.15 – A gauche: La courbe de conversion ADU en mesure physique le Jansky (Jy) varie en fonction des longueurs d'onde. A droite, trois courbes de transmission entre 5.7 et $5.8 \mu\text{m}$ montrent le bon recouvrement des filtres CVFs.

Grâce à ce bon échantillonnage, des méthodes de déconvolutions spectrales ont été testées dans le but d'améliorer le pouvoir de résolution des spectres (i.e. $\lambda/\Delta\lambda$). Nous avons testé trois méthodes différentes régularisées par un filtrage en multi-résolution. De façon similaire à la déconvolution spatiale, nous avons:

$$I(\lambda) = (O * T)(\lambda) + N(\lambda)$$

I = Spectre du CVF.

O = Spectre déconvolué.

T = Transmission (variable avec la longueur d'onde).

N = Bruit

Chaque méthode a été régularisée avec un filtrage utilisant la multi-résolution pour soustraire le bruit à chaque échelle. Pour chaque déconvolution on commence avec $O^{(k=0)}(\lambda) = I(\lambda)$ en supposant $O^{(k)} > 0$ à chaque itération. Le filtrage s'effectue des échelles $n=1$ jusqu'à 5 avec un critère de sélection à $\sigma = 5$.

$$R^{(k)} = I(\lambda) - T(\lambda) * O^{(k)}(\lambda) \longrightarrow \text{FILTER} \longrightarrow \overline{R^{(k)}}$$

1. Méthode de Van Cittert:

$$O^{(k+1)}(\lambda) = O^{(k)}(\lambda) + I(\lambda) - T(\lambda) * O^{(k)}(\lambda)$$

2. Méthode de Landweber:

$$O^{(k+1)}(\lambda) = O^{(k)}(\lambda) + T(-\lambda) * [I(\lambda) - T(\lambda) * O^{(k)}(\lambda)]$$

3. Méthode de Lucy-Richardson:

$$O^{(k+1)}(\lambda) = \left[\frac{I(\lambda)}{O^{(k)}(\lambda) * T(\lambda)} * T(-\lambda) \right] O^{(k)}(\lambda)$$

La convergence est atteinte quand nous avons:

$$(\sigma_{R(k-1)} - \sigma_{R(k)}) / \sigma_{R(k)} < 10^{-3}$$

Nous avons testé les algorithmes de déconvolution en partant d'un modèle connu convolué par la fonction de transfert spectral de l'instrument. Le but étant de retrouver le modèle de départ (voir Fig. B.16). La méthode de Van-Cittert est très sensible au bruit. Il est préférable d'utiliser d'autres algorithmes moins sensibles. Nous avons celui de Landweber et de Lucy-Richardson (utilisé par la suite sur les données observées).

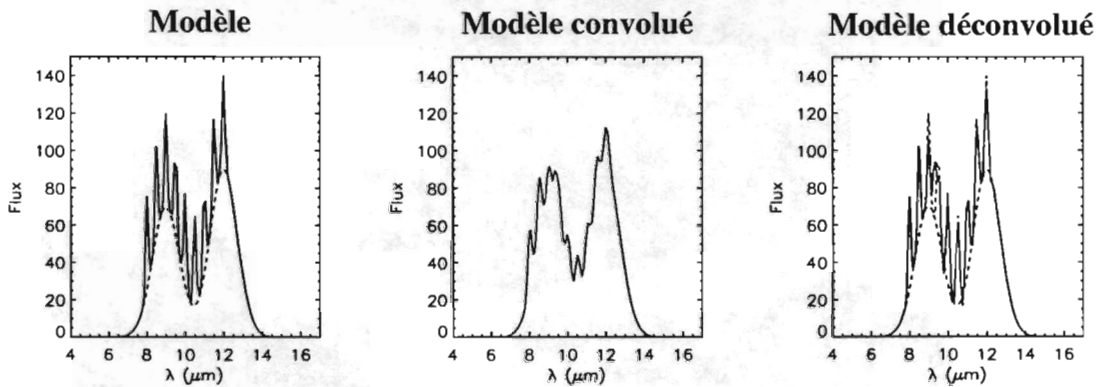


FIG. B.16 – Simulation de déconvolution spectrale sur un modèle convolué par la réponse spectrale de chaque filtre étroit du CVF. A gauche, le modèle est construit avec la combinaison de gaussiennes étroites superposées sur deux gaussiennes larges. Au milieu, on a convolué par la fonction de transfert spectrale. A gauche, on montre le résultat de la déconvolution en utilisant la méthode de Van-Cittert (en trait continu) superposé sur le modèle (en trait discontinu). A noter que les méthodes de Landweber et Lucy-Richardson ne convergent pas pour cet exemple.

Nous avons appliqué les 3 méthodes pour déconvoluer un spectre de la galaxie M82 présentant un très bon rapport signal sur bruit. Les différentes méthodes convergent vers une solution présentée dans la figure B.17. Les raies ioniques doivent être en théorie moins larges que les bandes infrarouges. On devrait être capable de les distinguer après déconvolution comme dans notre exemple où l'on voit clairement une extension sur le côté gauche de la raie à $12.8 \mu\text{m}$ qui pourrait être attribuée à la bande large à $12.7 \mu\text{m}$ (voir des exemples Fig. B.18).

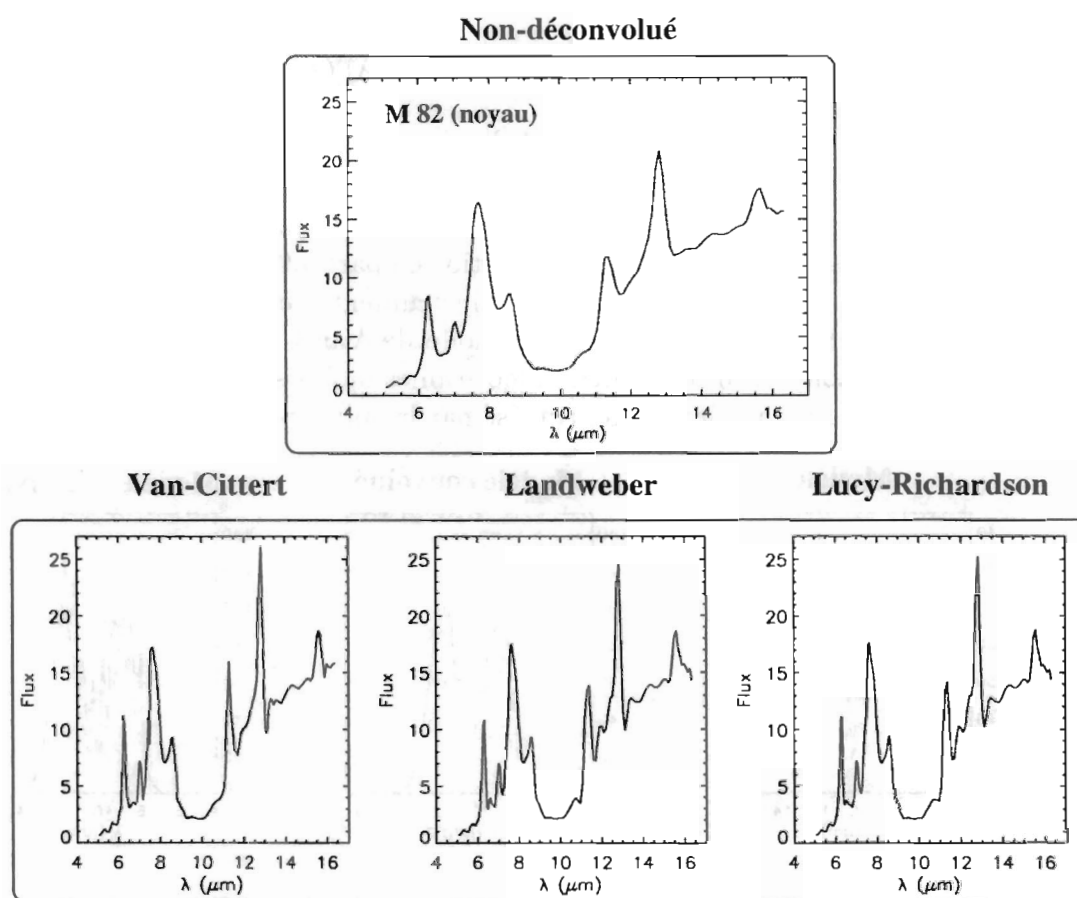


FIG. B.17 – Les trois méthodes de déconvolution sont utilisées sur le spectre du noyau de M82. Ce spectre présente l'avantage d'avoir à la fois les bandes infrarouges, des raies ioniques ainsi qu'un fort continuum à $15\mu\text{m}$. Les trois méthodes convergent vers une solution permettant de mieux séparer les bandes à 12 , 13.6 et $14.3\mu\text{m}$ (peut-être à $15\mu\text{m}$) observées avec le spectromètre à haute résolution ISO-SWS. Un pic à $10.7\mu\text{m}$ pourrait provenir de la raie [SIV]. A $6.7\mu\text{m}$, une petite raie peut être attribuable à un mode vibrationnel de H_2 .

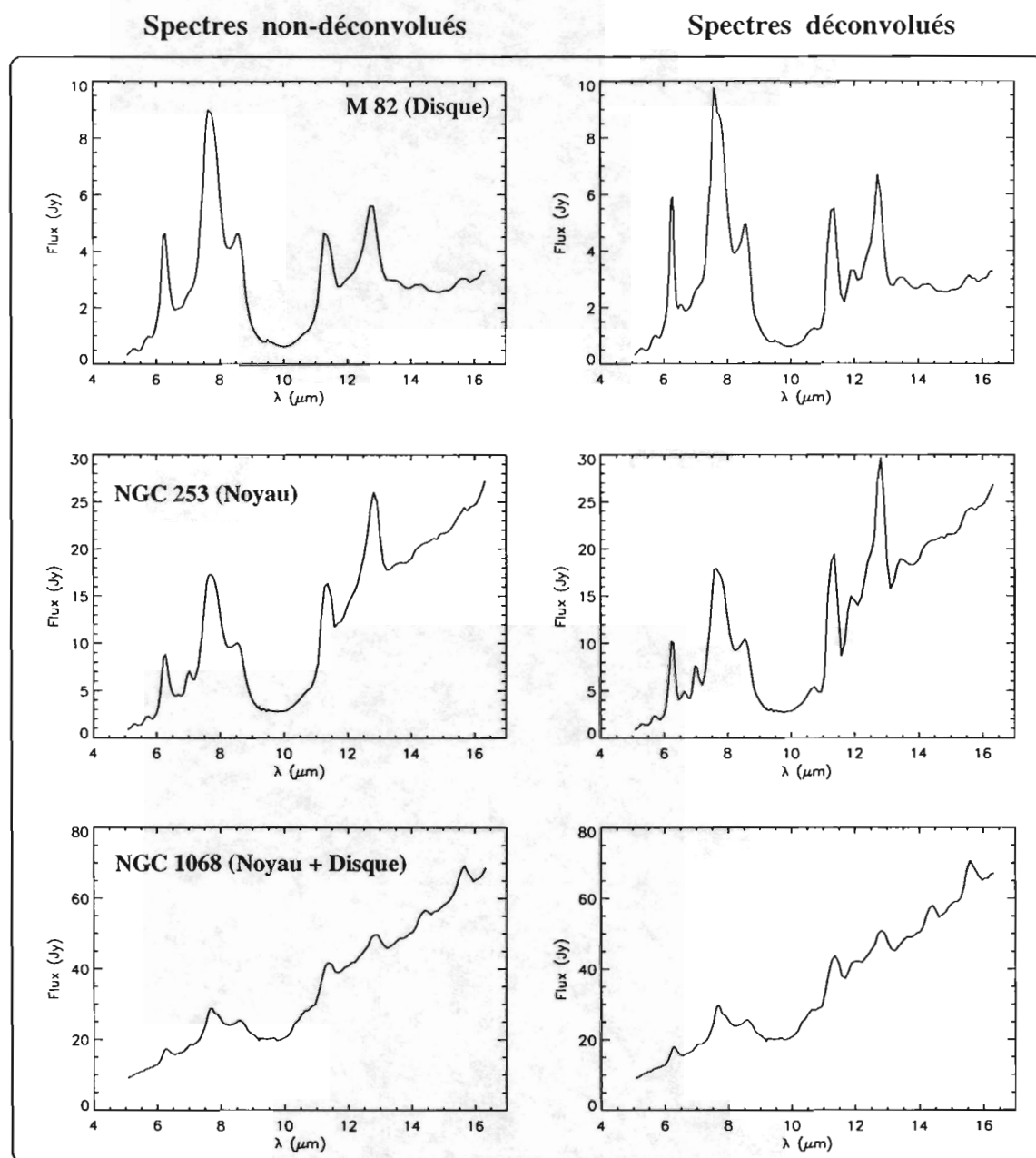
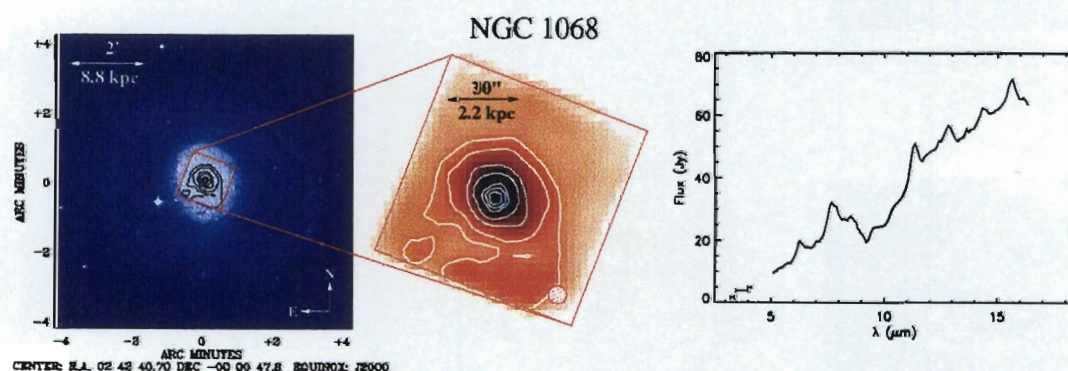


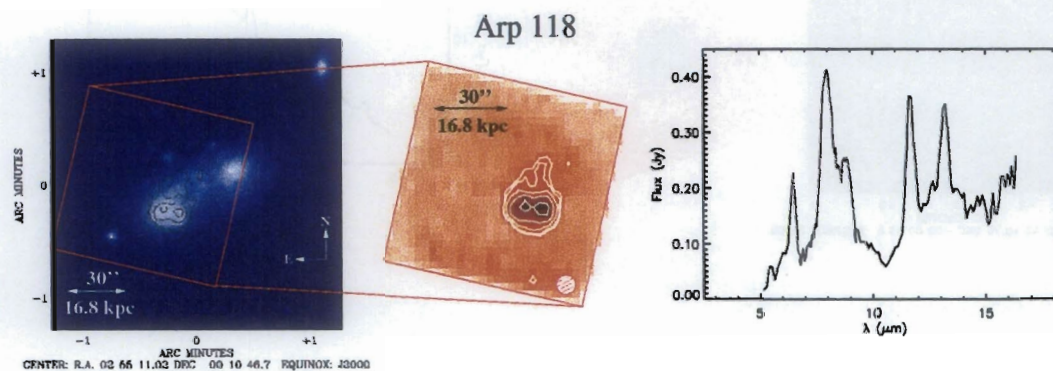
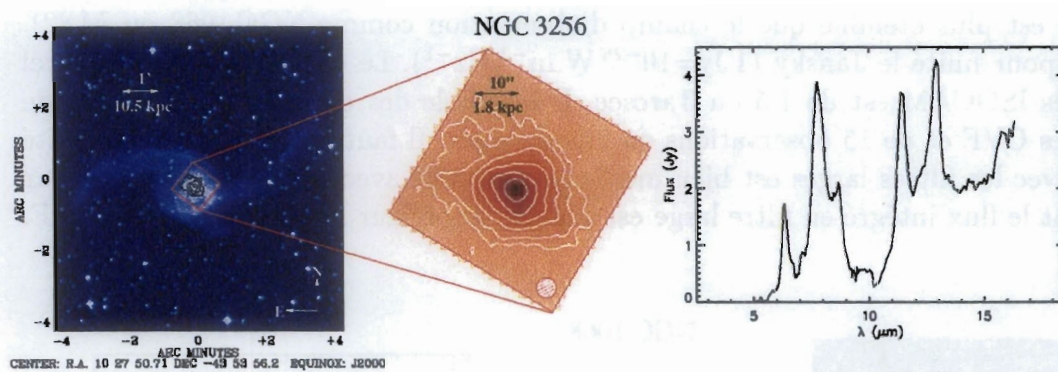
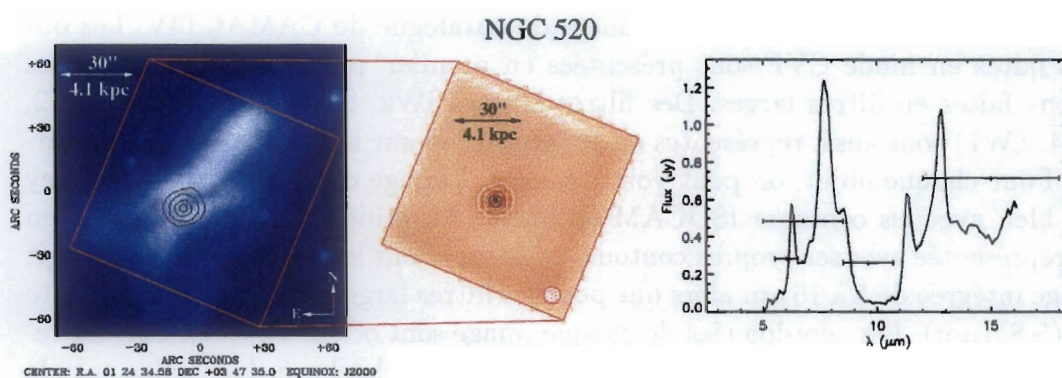
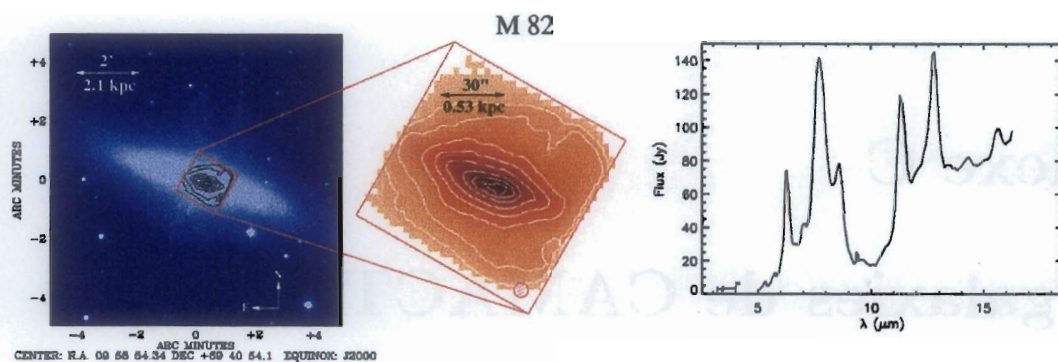
FIG. B.18 – Trois exemples de déconvolution spectrale. Dans la colonne de gauche, les spectres sont non-déconvolués, et dans celle de droite, les spectres ont été déconvolués en utilisant la méthode de Lucy-Richardson. En haut: spectre d'un disque de galaxie spirale. Au milieu: spectre d'un noyau "starburst". En bas: spectre d'un "AGN" avec une contribution starburst.

Annexe C

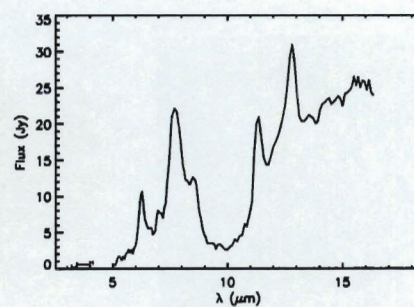
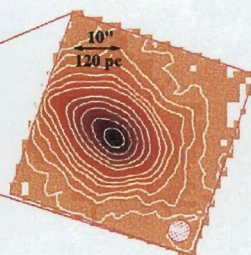
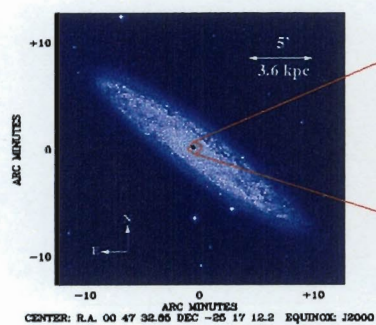
Les galaxies de CAMACTIV.

Cette annexe regroupe l'ensemble des données du catalogue de CAMACTIV. Les observations faites en mode CVF sont présentées en premier, puis viennent ensuite les observations faites en filtres larges. Des filtres larges (SW2, SW3, SW6, SW8, LW2, LW3, LW4, LW7) sont aussi représentés en superposition sur le spectre CVF dans certains cas. Pour chaque objet, on peut voir à gauche, l'image du Digitized Sky Survey (DSS) en bleu avec les contours ISOCAM en blanc. Au milieu, l'image ISOCAM en rouge est représentée avec ses propres contours en blanc. Pour les spectres CVF, il s'agit d'une image intégrée de 5 à 16 μm alors que pour les filtres larges, on a pris l'image faite avec LW2(5-8.5 μm). Les coordonnées de chaque image sont orientées Nord-Est. La résolution spatiale de la carte ISO est indiquée par un cercle hachuré. L'échelle spatiale en parsec est aussi indiquée pour $H_0=75 \text{ km.s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$. A droite, on a la distribution spectrale d'énergie intégrée sur l'objet ou sur le champ total observé (dans le cas où la galaxie est plus étendue que le champ d'observation comme NGC 1068 ou M 82). Le flux a pour unité le Jansky ($1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{ W.m}^{-2}.\text{Hz}^{-1}$). Le champ de vue par pixel des images ISOCAM est de 1.5 ou 3 arcsec. L'ensemble des données est composé de 14 spectres CVF et de 15 observations en filtres larges. Il faut noter que la sensibilité obtenue avec les filtres larges est bien meilleure que celle avec les spectres et que par conséquent le flux intégré en filtre large est souvent supérieur au flux intégré en CVF.

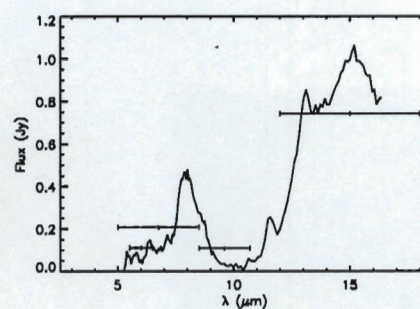
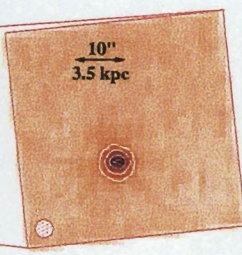
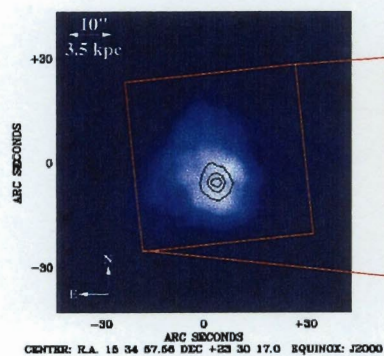




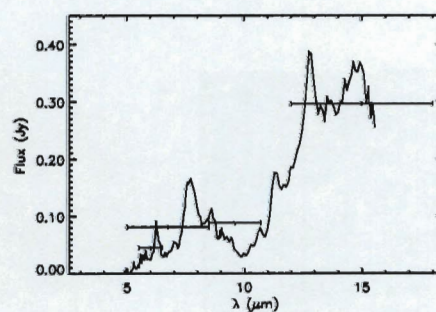
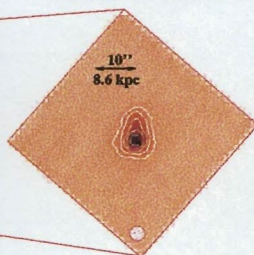
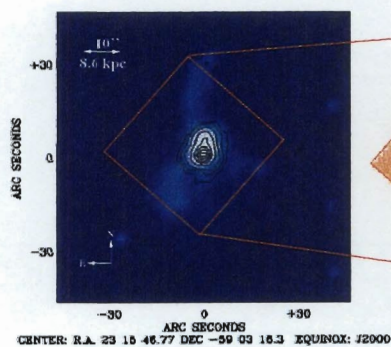
NGC 253



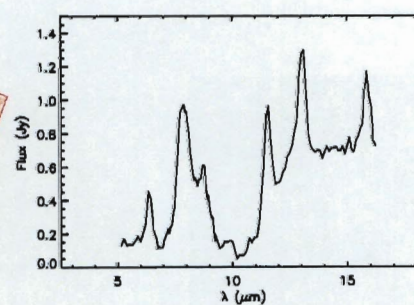
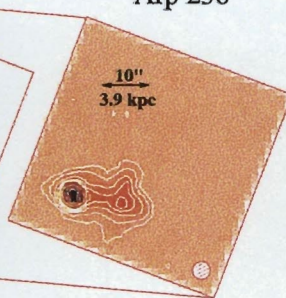
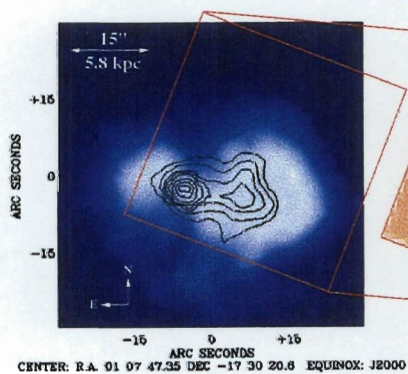
Arp 220

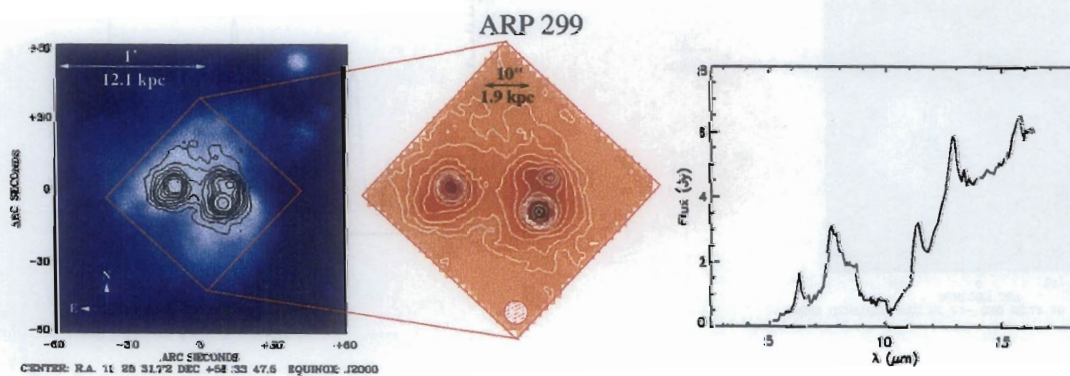
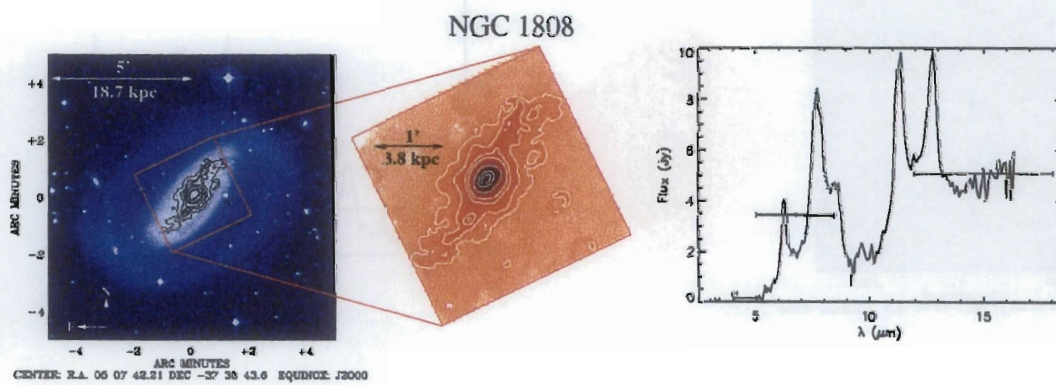
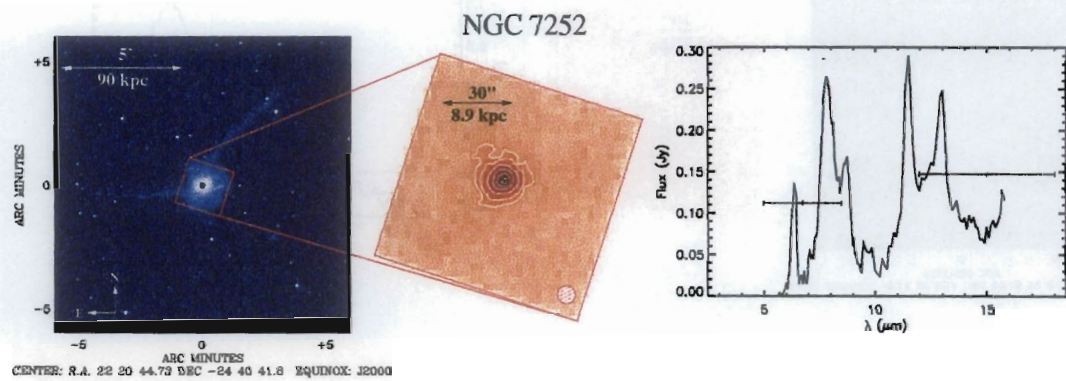
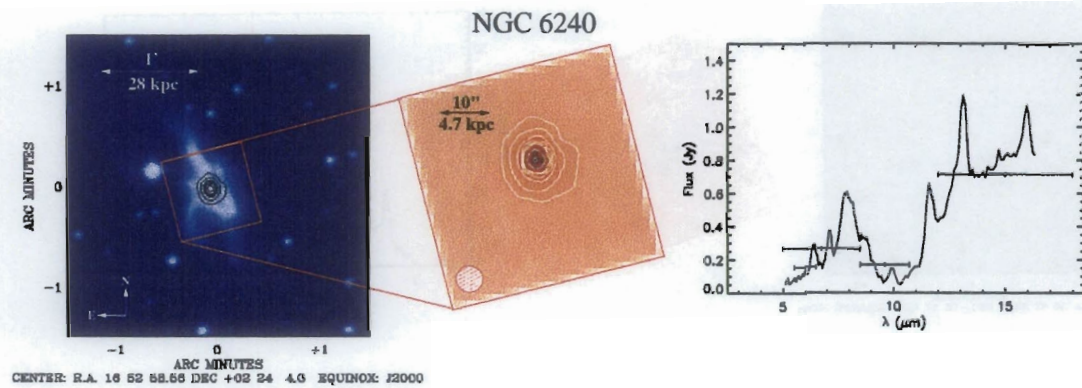


IRAS 23128-5919

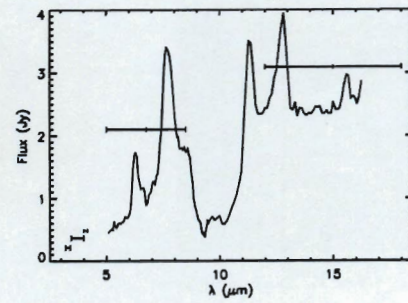
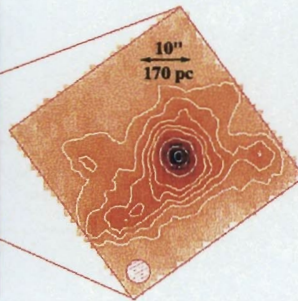
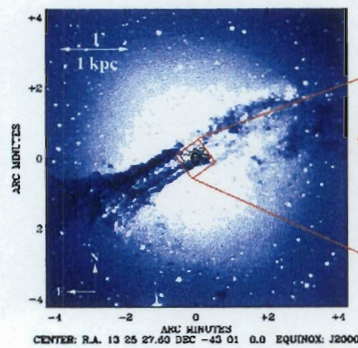


Arp 236

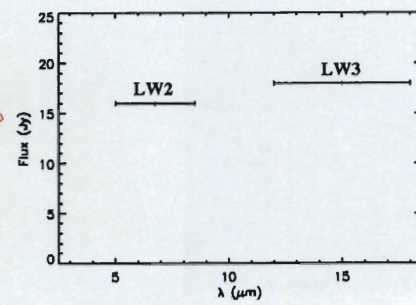
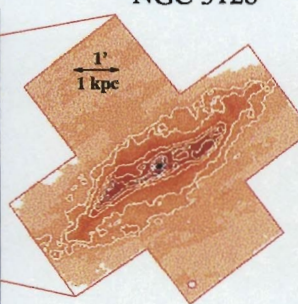
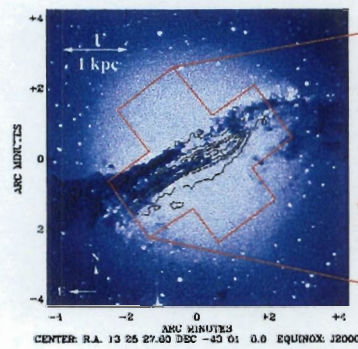




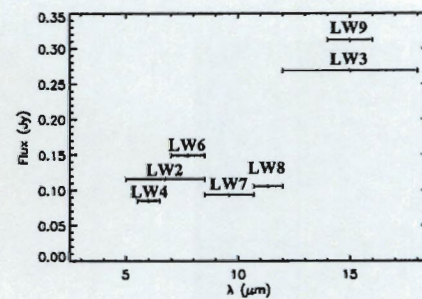
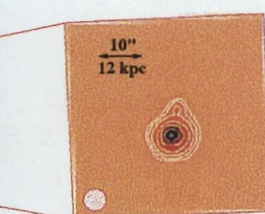
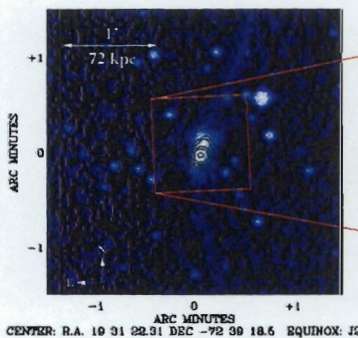
NGC 5128



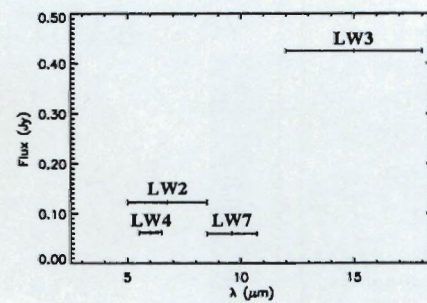
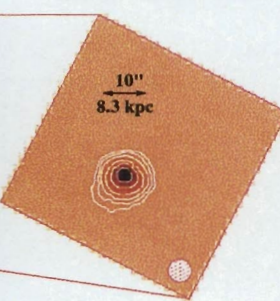
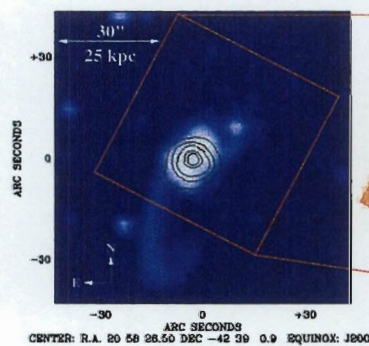
NGC 5128



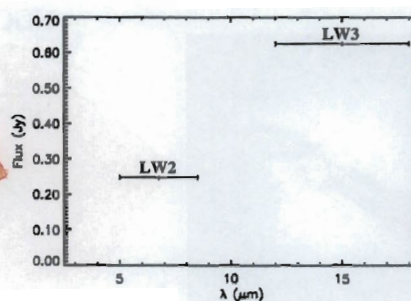
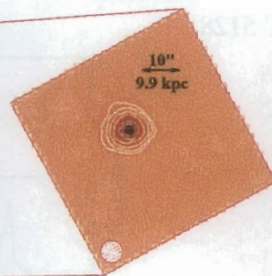
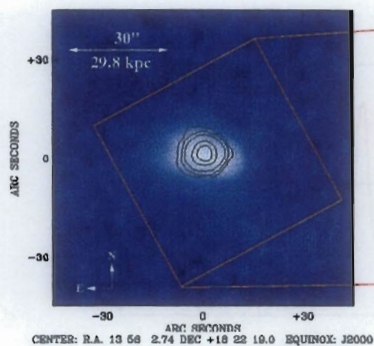
IRAS 19254-7245



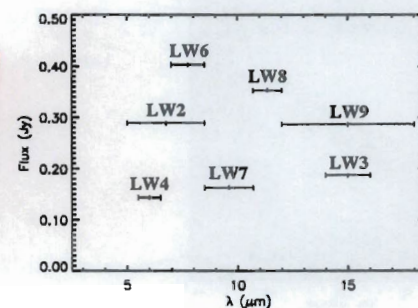
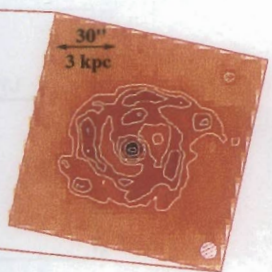
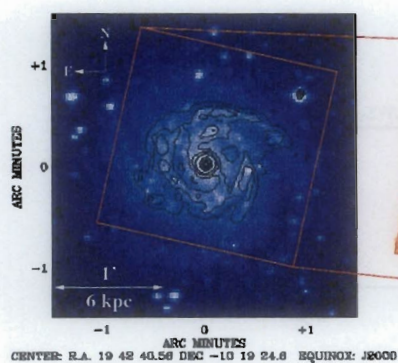
IRAS 20551-4250



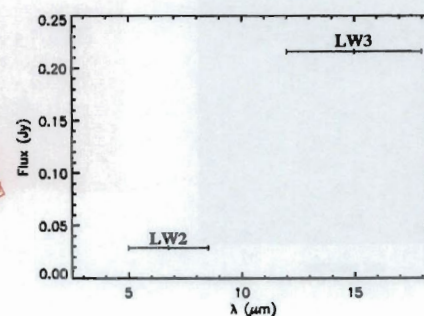
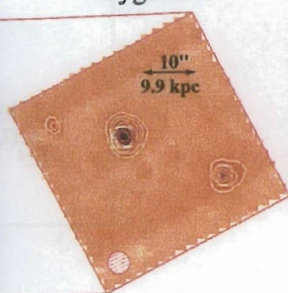
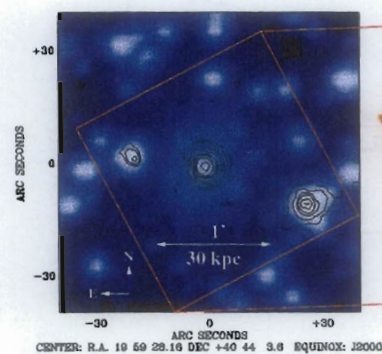
Mrk 463



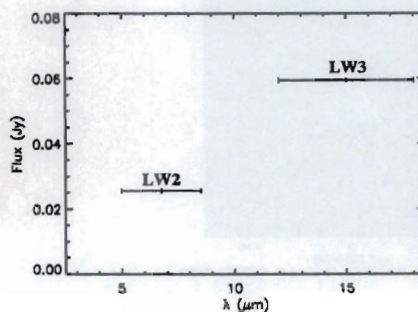
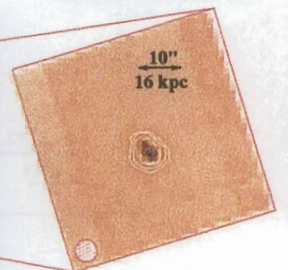
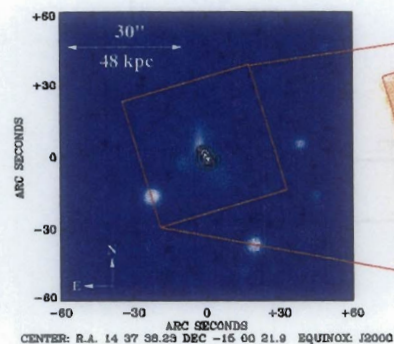
NGC 6814



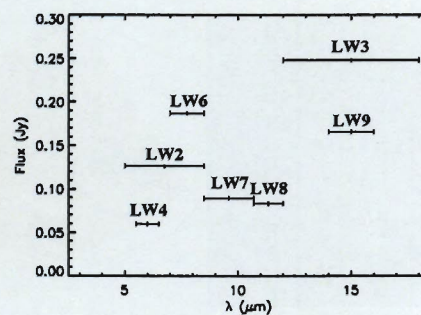
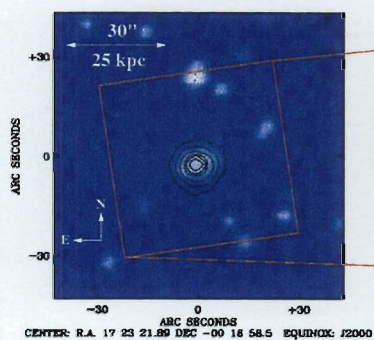
Cygnus A



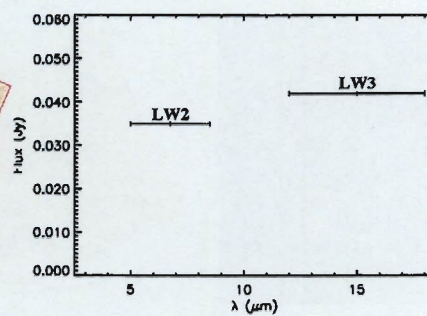
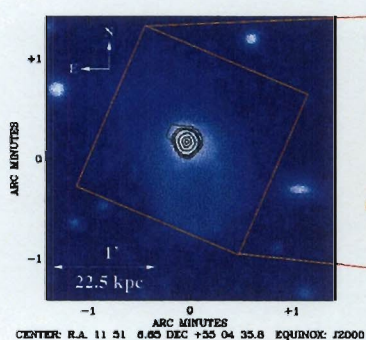
IRAS 14348-1447



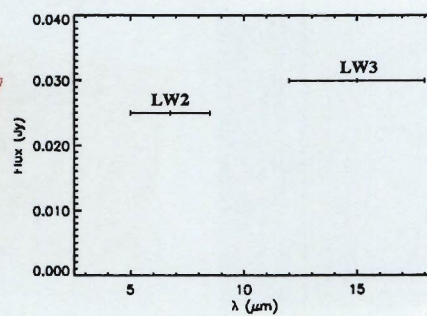
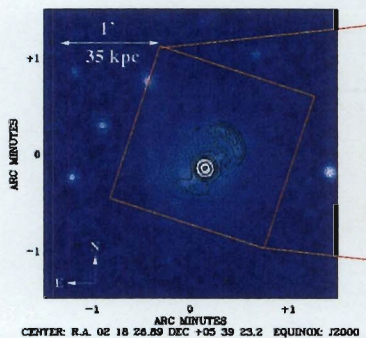
IRAS 17208-0014



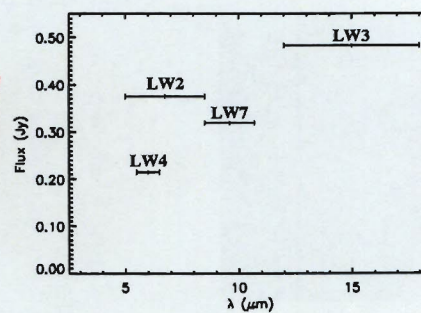
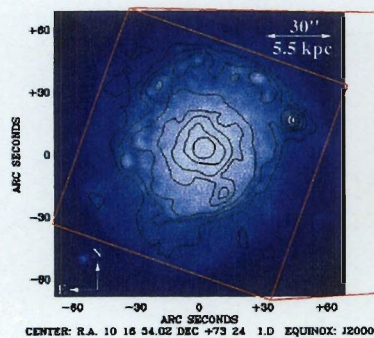
NGC 3921

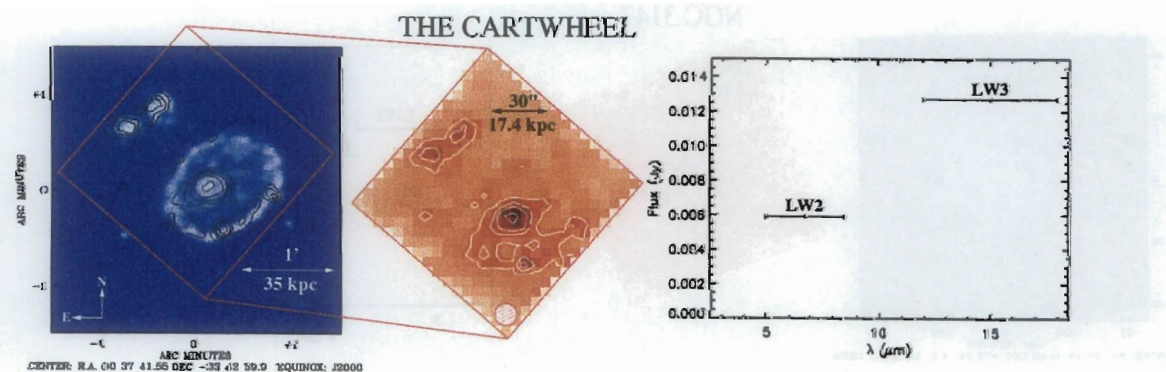
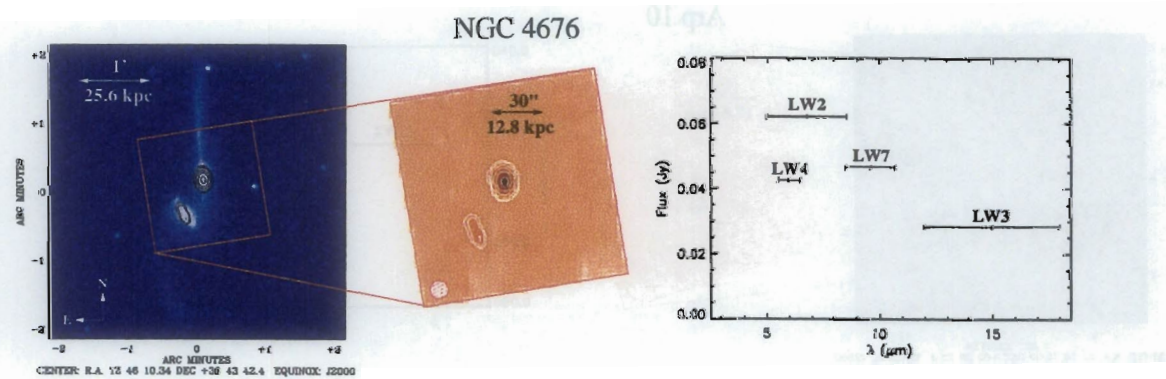
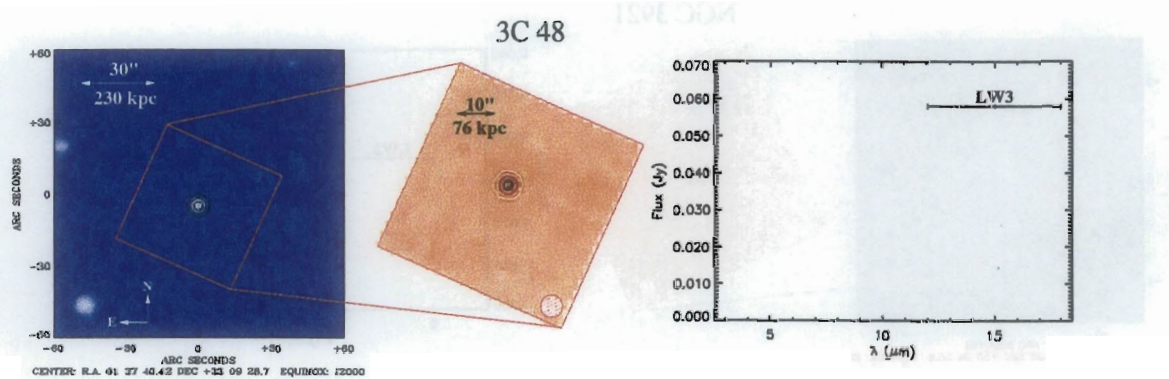
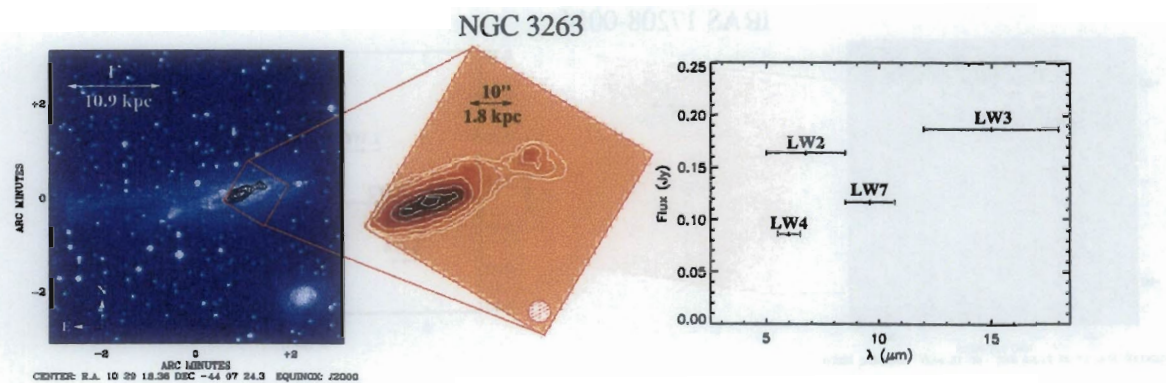


Arp 10



NGC 3147





Bibliographie

- Aalto, S., Radford, S., Scoville, N., and Sargent, A. (1997). Variation of Molecular Line Ratios and Cloud Properties in the Arp 299 Galaxy Merger. *Astrophys. J.*, 475:L107–L110.
- Abergel, A. and Coulais, A. (1998). New method to correct ISOCAM-LW transient effects: First results. *Technical report*.
- Abergel, A., Miville-Deschênes, M., Désert, F.-X., Péroult, M., Aussel, H., and Sauvage, M. (1998). The transient behaviour of the long wavelength channel of ISOCAM. *ISO detector workshop proceedings*.
- Achtermann, J. and Lacy, J. (1995). Structure and kinematics within the Starburst nucleus of M82: Searching for a bar. *Astrophys. J.*, 439:163–175.
- Aitken, D., Briggs, G., Bailey, J., Roche, P., and Hough, J. (1984). Infrared spectropolarimetry of Seyfert galaxy NGC 1068. *Nature*, 310:660–662.
- Allain, T., Leach, S., and Sedlmayr, E. (1996). Photodestruction of PAHs in the interstellar medium. I. Photodissociation rates for the loss of an acetylenic group. *Astron. Astrophys.*, 305:602–615.
- Alloin, D. and Marco, O. (1997). The Elusive Dust Torus of NGC 1068 Unveiled by Adaptive Optics Observations from 2.2 microns to 4.8 microns. *Astrophys. Sp. Sci.*, 248:237–244.
- Amram, P., Le Coarer, E., Marcelin, M., Balkowski, C., Sullivan, W., and Cayatte, V. (1992). H-alpha velocity fields and rotation curves of galaxies in clusters. *Astro. Astrophys. Suppl. Ser.*, 94:175–209.
- Antonucci, R. (1993). Unified models for active galactic nuclei and quasars. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 31:473–521.
- Antonucci, R. and Miller, J. (1985). Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068. *Astrophys. J.*, 297:621–632.
- Aoki, W., Tsuji, T., and Ohnaka, K. (1998). The high energy muon spectrum in Extensive Air Showers: first data from LVD and EAS-TOP at Gran Sasso. *Astron. Astrophys.*, 340:222–231.

- Appleton, P. and Marston, A. (1997). Multiwavelength Observations of Collisional Ring Galaxies. I. Broad-Band Images, Global Properties, and Radial Colors of the Sample Galaxies. *Astron. J.*, 113:201–224.
- Arp, H. (1966). Atlas of peculiar galaxies. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 14:1–20.
- Augarde, R. and Lequeux, J. (1985). Peculiar motions and star formation in the interacting galaxy complex Mk 171 = NGC 3690 + IC 694. *Astron. Astrophys.*, 147:273–280.
- Aussel, H. (1999). *Formation et évolution des galaxies, observées dans l'infrarouge moyen*. PhD thesis, Paris VII.
- Baade, W. and Minkowski, R. (1954). Identification of the radio sources in Cassiopeia, Cygnus A, and Puppis A. *Astrophys. J.*, 119:206–214.
- Baldwin, J., Wilson, A., and Whittle, M. (1987). Kinematics and ionization of extended gas in active galaxies. III - The extranuclear properties of NGC 1068. *Astrophys. J.*, 319:84–104.
- Barvainis, R. (1987). Hot dust and the near-infrared bump in the continuum spectra of quasars and active galactic nuclei. *Astrophys. J.*, 320:537–544.
- Beintema, D., van den Ancker, M., Molster, F., Waters, L., and Tielens, A. (1996). The rich spectrum of circumstellar PAHs. *Astron. Astrophys.*, 315:L369–L372.
- Biviano, A., Blommaert, J., Laurent, O., Okumura, K., Siebenmorgen, R., Altieri, B., Boulade, O., Gallais, P., Metcalfe, L., and Ott, S. (1998a). The isocam flat field calibration report. *ESA report*.
- Biviano, A., Sauvage, M., Gallais, P., Roman, P., Altieri, B., Boulade, O., Guest, S., Metcalfe, L., Okumura, K., and Ott, S. (1998b). The isocam dark current calibration report. *ESA report*.
- Blandford, R. and Königl, A. (1979). Relativistic jets as compact radio sources. *Astrophys. J.*, 232:34–48.
- Bock, J., Marsh, K., Ressler, M., and Werner, M. (1998). High-Resolution Mid-Infrared Imaging of the Nucleus of NGC 1068. *Astrophys. J.*, 504:L5–L10.
- Boselli, A., Lequeux, J., Sauvage, M., Boulade, O., Boulanger, F., Cesarsky, D., Dupraz, C., Viallefond, F., and Vigroux, L. (1998). Mid-IR emission of galaxies in the Virgo cluster. II. Integrated properties. *Astron. Astrophys.*, 335:53–68.
- Boulade, O., Sauvage, M., Altieri, B., Blommaert, J., Gallais, P., Guest, S., Metcalfe, L., Okumura, K., Ott, S., Tran, D., and Vigroux, L. (1996). NGC 5195 - a look into the hot dusty ISM of an interacting SB0 galaxy with ISOCAM. *Astron. Astrophys.*, 315:L85–L88.

- Boulanger, F., Boissel, P., Cesarsky, D., and Ryter, C. (1998). The shape of the unidentified infra-red bands: analytical fit to ISOCAM spectra. *Astron. Astrophys.*, 339:194–200.
- Boulanger, F. and Perault, M. (1988). Diffuse infrared emission from the galaxy. I - Solar neighborhood. *Astrophys. J.*, 330:964–985.
- Braatz, J., Wilson, A., Gezari, D., Varosi, F., and Beichman, C. (1993). High-resolution mid-infrared imaging and astrometry of the nucleus of the Seyfert galaxy NGC 1068. *Astrophys. J.*, 409:L5–L8.
- Bregman, J., Schulman, E., and Tomisaka, K. (1995). High-resolution X-ray imaging of the Starburst Galaxy M82. *Astrophys. J.*, 439:155–162.
- Bushouse, H., Telesco, C., and Werner, M. (1998). The Distribution of Mid- and Far-Infrared Emission in 10 Interacting Galaxy Systems. *Astron. J.*, 115:938–946.
- Cameron, M., Storey, J., Rotaciuc, V., Genzel, R., Verstraete, L., Drapatz, S., Siebormorgen, R., and Lee, T. (1993). Subarcsecond Mid-Infrared Imaging of Warm Dust in the Narrow-Line Region of NGC 1068. *Astrophys. J.*, 419:136–149.
- Carico, D., Sanders, D., Soifer, B., Elias, J., Matthews, K., and Neugebauer, G. (1988). The IRAS Bright Galaxy Sample. III - 1-10 micron observations and coadded IRAS data for galaxies with L(IR) equal to or greater than 10 to the 11th solar luminosities. *Astron. J.*, 95:356–373.
- Casoli, F., Willaime, M.-C., Viallefond, F., and Gerin, M. (1999). Molecular gas in the system of merging galaxies Arp 299. *Astron. Astrophys.*, 346:663–674.
- Cesarsky, C., Abergel, A., Agnese, P., Altieri, B., and Augueres, J.L. et al. (1996a). ISOCAM in flight. *Astron. Astrophys.*, 315:L32–L37.
- Cesarsky, D., Lequeux, J., Abergel, A., Perault, M., Palazzi, E., madden, S., and Tran, D. (1996b). Infrared spectrophotometry of M17 with ISOCAM. *Astron. Astrophys.*, 315:L309–L312.
- Cesarsky, D., Lequeux, J., Abergel, A., Perault, M., Palazzi, E., madden, S., and Tran, D. (1996c). Infrared spectrophotometry of NGC 7023 with ISOCAM. *Astron. Astrophys.*, 315:L305–L308.
- Charmandaris, V., Appleton, P., and Marston, A. (1993). Threshold star-formation effects in the peculiar galaxy Arp 10 (= VV 362). *Astrophys. J.*, 414:154–164.
- Charmandaris, V., Laurent, O., Mirabel, I., and Gallais (1999a). Mid-IR imaging of Toomre's Merger Sequence. *ASP Conference Series*, page 117.
- Charmandaris, V., Laurent, O., Mirabel, I., Gallais, P., Sauvage, M., Vigroux, L., Cesarsky, C., and Appleton, P. (1999b). Dust in the wheel: The Cartwheel galaxy in the Mid-IR. *Astron. Astrophys.*, 341:69–73.

- Claret, A. (1999). CAM Glitches. *3rd ISOCAM Calibration workshop*.
- Colina, L., Lipari, S., and Macchetto, F. (1991). Massive star formation and superwinds in IRAS 19254 - 7245 (the 'Superantennae'). *Astrophys. J.*, 379:113-121.
- Combes, F., Boisse, P., Mazure, A., Blanchard, A., and Seymour, M. (1995). *Galaxies and Cosmology*. Springer-Verlag-Astronomy and Astrophysics Library, Berlin Heidelberg New York.
- Condon, J., Huang, Z.-P., Yin, Q., and Thuan, T. (1991). Compact starbursts in ultraluminous infrared galaxies. *Astrophys. J.*, 378:65-76.
- Coulais, A. and Abergel, A. (1998). Transient correction of the ISOCAM data with the Fouks-Schubert model: first results. *Technical report*.
- de Grijp, M., Miley, G., Lub, J., and de Jong, T. (1985). Infrared Seyferts - A new population of active galaxies? *Nature*, 314:240-242.
- de Grijp, M., Miley, G., Lub, J., and de Jong, T. (1995). Spectroscopy of luminous infrared galaxies at 2 microns: 1. The ultraluminous galaxies (L_{IR}) approximately greater than 10^{12} solar luminosity). *Astrophys. J.*, 444:97-112.
- Delattre, C. (1996). About Transients. *Technical report*.
- Desert, F.-X., Boulanger, F., and Puget, J. (1990). Interstellar dust models for extinction and emission. *Astron. Astrophys.*, 237:215-236.
- Duc, P.-A., Mirabel, I., and Maza, J. (1997). Southern ultraluminous infrared galaxies: An optical and infrared database. *Astro. Astrophys. Suppl. Ser.*, 124:533-557.
- Dudley, C. and Wynn-Williams, C. (1997). The Deep Silicate Absorption Feature in IRAS 08572+3915 and Other Infrared Galaxies. *Astrophys. J.*, 488:720-729.
- Dyck, H., Van Belle, G., and Thompson, R. (1998). Radii and Effective Temperatures for K and M Giants and Supergiants. II. *Astron. J.*, 116:981-986.
- Eckart, A., Cameron, M., Rothermel, H., Wild, W., Zinnecker, H., Rydbeck, G., Oldberg, M., and Wiklind, T. (1990). Observations of CO isotopic emission and the far-infrared continuum of Centaurus A. *Astrophys. J.*, 363:451-463.
- Efstathiou, A. and Rowan-Robinson, M. (1994). Multigrain dust cloud models of compact HII regions. *Mon. Not. R. astr. Soc.*, 266:212-218.
- Elvis, M. and Lawrence, A. (1988). Hard X-ray emission from a type 2 Seyfert galaxy (NGC 1068). *Astrophys. J.*, 331:161-171.
- Engelbracht, C., Rieke, M., and Rieke, G. (1998). The nuclear starburst in NGC 253. *Astrophys. J.*, 505:639-658.

- Fadda, D., Giuricin, G., Granato, G., and Vecchies, D. (1998). The Near- and Mid-Infrared Continuum Emission of Seyfert Nuclei: Constraints on the Models of Obscuring Tori. *Astrophys. J.*, 496:117-132.
- Feuchtgruber, H., Lutz, D., Beintema, D., Valentijn, E., and Bauer, O. (1997). New Wavelength Determinations of Mid-Infrared Fine-Structure Lines by Infrared Space Observatory Short-Wavelength Spectrometer. *Astrophys. J.*, 487:962-966.
- Filippenko, A. (1989). The 'Seyfert 1' optical spectra of the type II supernovae 1987F and 1988I. *Astron. J.*, 97:726-734.
- Fouks, B. and Schubert, J. (1995). Precise theoretical description of photoresponse for detectors of ISOPHOT's Si:Ga array. *Proc. SPIE*, 2475:487-498.
- Franchini, M., Morossi, C., and Malagnini, M. (1998). Far-Ultraviolet Continuum of G-Type Stars: A Signature of the Temperature Minimum Region. *Astrophys. J.*, 508:370-379.
- Freedman, W., Hughes, S., Madore, B., Mould, J., and Lee, M.G. et al. (1994). The Hubble Space Telescope Extragalactic Distance Scale Key Project. 1: The discovery of Cepheids and a new distance to M81. *Astrophys. J.*, 427:628-655.
- Friedman, S., Cohen, R., Jones, B., Smith, H., and Stein, W. (1987). Imaging and spectroscopic studies of the interacting system Markarian 171. *Astron. J.*, 94:1480-1486.
- Frogel, J., Persson, S., Matthews, K., and Aaronson, M. (1978). Photometric studies of composite stellar systems. I - CO and JHK observations of E and S0 galaxies. *Astrophys. J.*, 220:75-97.
- Gallais, P. (1991). *L'activité dans les régions centrales de galaxies: L'apport de l'imagerie infrarouge entre 1 et 5 microns*. PhD thesis, Université Paris VII.
- Gallais, P., Laurent, O., Charmandaris, V., Rouan, D., Mirabel, I., Sauvage, M., Tran, D., and Vigroux, L. (1999). ISOCAM observations of the interacting galaxy system Mrk 171. *ISO Conference: The Universe as seen by ISO, ESA Special Publications series (SP-427)*.
- Gastaud, R. (1999). Jitter Detection and Correction. *3rd ISOCAM Calibration workshop*.
- Gehrz, R., Sramek, R., and Weedman, D. (1983). Star bursts and the extraordinary galaxy NGC 3690. *Astrophys. J.*, 267:551-562.
- Genzel, R., Lutz, D., Sturm, E., Egami, E., Kunze, D., Moorwood, A., Rigopoulou, D., Spoon, H., Sternberg, A., Tacconi-Garman, L., Tacconi, L., and Thatte, N. (1998a). What Powers Ultraluminous IRAS Galaxies? *Astrophys. J.*, 498:579-605.

- Genzel, R., Lutz, D., and Tacconi, L. (1998b). Star formation triggered by galaxy collisions. *Nature*, 395:859–862.
- Giard, M., Serra, G., Caux, E., Pajot, F., and Lamarre, J. (1988). First detection of the aromatic 3.3-micron feature in the diffuse emission of the Galactic disk. *Astron. Astrophys.*, 201:L1–L4.
- Graham, J., Carico, D., Matthews, K., Neugebauer, G., Soifer, B., and Wilson, T. (1990). The double nucleus of Arp 220 unveiled. *Astron. J.*, 354:L5–L8.
- Granato, G., Danese, L., and Franceschini, A. (1987). Thick Tori around Active Galactic Nuclei: The Case for Extended Tori and Consequences for Their X-Ray and Infrared Emission. *Astrophys. J.*, 486:147–159.
- Hall, D., Ridgway, S., Kleinmann, S., and Scoville, N. (1981). 2 micron spectroscopy of the nucleus of NGC 1068. *Astrophys. J.*, 248:898–905.
- Heckman, T., Armus, L., Waeber, K., and Wang, J. (1999). An X-Ray and Optical Investigation of the Starburst-driven Superwind in the Galaxy Merger Arp 299. *Astrophys. J.*, 517:130–147.
- Helfer, T. and Blitz, L. (1995). High-Resolution Berkeley-Illinois-Maryland Association Observations of CO, HCN, and ^{13}CO in NGC 1068. *Astrophys. J.*, 450:90.
- Helou, G. (1986). The IRAS colors of normal galaxies. *Astrophys. J.*, 311:L33–L36.
- Hibbard, J. and Yun, M. (1996). Cold Gas at High Redshift. *ed. M. Bremer, H. Rottgering, P. van der Werf, C. Carilli, Dordrecht:Kluwer.*
- Hibbard, J. and Yun, M. (1999). A 180 Kiloparsec Tidal Tail in the Luminous Infrared Merger Arp 299. *Astrophys. J.*, 118:162–185.
- Higdon, J. (1995). Wheels of Fire. I. Massive Star Formation in the Cartwheel Ring Galaxy. *Astrophys. J.*, 455:524–535.
- Holmger, E. (1941). On the clustering tendencies among the nebulae. II. A study of encounters between laboratory models of stellar systems by a new integration procedure. *Astrophys. J.*, 94:385–395.
- Hron, J., Loidl, R., Hoefner, S., Jorgensen, U., Aringer, B., and Kerschbaum, F. (1998). ISO-SWS spectra of the C-rich AGB star R Scl and dynamical model atmospheres. *Astron. Astrophys.*, 335:L69–L72.
- Hubble, E. (1926). Extragalactic nebulae. *Astrophys. J.*, 64:321–369.
- Hui, X., Ford, H., Ciardullo, R., and Jacoby, G. (1998). The planetary nebula system and dynamics of NGC 5128. I - Planetary nebulae as standard candles. *Astrophys. J.*, 414:463–473.
- Hummel, E. and van der Hulst, J. (1986). NGC 4038/39 - Interacting spiral galaxies with enhanced extended radio emission. *Astron. Astrophys.*, 155:151–160.

- Israel, F. (1998). Centaurus A - NGC 5128. *Astro. Astrophys. Review*, 8:237-278.
- Israel, F., van Dishoeck, E., Baas, F., de Graauw, T., and Phillips, T. (1991). CO J = 1-0, 2-1 and 3-2 absorption and emission toward the nucleus of Centaurus A(asterisk) - Probing the circumnuclear disk. *Astron. Astrophys.*, 245:L13-L16.
- Joseph, R. and Wright, G. (1985). Recent star formation in interacting galaxies. II - Super starburst in merging galaxies. *Mon. Not. R. astr. Soc.*, 214:87-95.
- Joy, M. and Lester, D. (1988). Near-infrared line and continuum emission from the blue dwarf galaxy II Zw 40. *Astrophys. J.*, 331:145-153.
- Joy, M., Telesco, C., Decher, R., Lester, D., Harvey, P., Rickard, L., and Bushouse, H. (1989). The far-infrared structure of the luminous interacting galaxy Arp 299. *Astrophys. J.*, 339:100-105.
- Justtanont, K., Tielens, A., de Jong, T., Cami, J., Waters, L., and Yamamura, I. (1999). Atomic fine-structure lines in the ISO-SWS spectra of the supergiants alpha Orionis and alpha Scorpii. *Astron. Astrophys.*, 345:605-610.
- Justtanot, K., Yamamura, I., de Jong, T., and Waters, L. (1997). ISO-SWS Spectra of AGB Stars. *Astrophys. Sp. Sci.*, 255:25-30.
- Kessler, M., Steinz, J., Anderegg, M., Clavel, J., and Drechsel, G. et al. (1996). The Infrared Space Observatory (ISO) mission. *Astron. Astrophys.*, 315:L27-L31.
- Keto, E., Hora, J., Deutsch, L., H. W., Fazio, G., Ball, R., Meixner, M., Skinner, C., Arens, J., and Jernigan, G. (1997). The Infrared Bright Nuclei in the Mid-Infrared. *Astrophys. J.*, 485:598-604.
- Kim, D.-C., Veilleux, S., and Sanders, D. (1998). The IRAS 1 Jy Sample of Ultraluminous Infrared Galaxies. II. Optical Spectroscopy. *Astrophys. J.*, 508:627-647.
- Knapp, G. and Rupen, M. (1996). Molecular Gas in Elliptical Galaxies: CO Observations of an IRAS Flux-limited Sample. *Astrophys. J.*, 460:271-283.
- Knapp, G., Rupen, M., Fich, M., Harper, D., and Wynn-Williams, C. (1996). ISO observations of hot dust in the nucleus of the S0 galaxy NGC 3998. *Astron. Astrophys.*, 315:L75-L78.
- Kunze, D., Rigopoulou, D., Lutz, D., Egami, E., Feuchtgruber, H., Genzel, R., Spoon, H., Sturm, E., Sternberg, A., Moorwood, A., and de Graauw, T. (1996). SWS spectroscopy of the colliding galaxies NGC4038/39. *Astron. Astrophys.*, 315:L101-L104.
- Larkin, J., Graham, J., Matthews, K., Soifer, B., Beckwith, S., Herbst, T., and Quillen, A. (1994). High-resolution continuum and Br (gamma) imaging observations of M82. *Astrophys. J.*, 420:159-170.

- Laurent, O., Mirabel, I., Charmandaris, V., Gallais, P., Madden, S., Sauvage, M., Vigroux, L., and Cesarsky, C. (1999). Mid-infrared diagnostics to distinguish AGNs from starbursts. *Astron. Astrophys.*, soumis.
- Léger, A., d'Hendecourt, L., and Défourneau, D. (1989). Physics of IR emission by interstellar PAH molecules. *Astron. Astrophys.*, 216:148–164.
- Liu, X.-W., Barlow, M., Nguyen-Q-Rieu, Truong-Bach, and Cox, P. (1996). The ISO LWS grating spectrum of NGC 7027. *Astron. Astrophys.*, 315:L257–L260.
- Lonsdale, C., Smith, H., and Lonsdale, C. (1993). The starburst-AGN connection - A sensitive VLBI survey of luminous IRAS galaxies. *Astrophys. J.*, 405:L9–L12.
- Lutz, D., Feuchtgruber, H., Genzel, R., Kunze, D., Rigopoulou, D., Spoon, H., and Wright, C.M. et al. (1996). SWS observations of the Galactic center. *Astron. Astrophys.*, 315:L269–L272.
- Lutz, D., Spoon, H., Rigopoulou, D., Moorwood, A., and Genzel, R. (1998a). The Nature and Evolution of Ultraluminous Infrared Galaxies: A Mid-Infrared Spectroscopic Survey. *Astrophys. J.*, 505:L103–L107.
- Lutz, D., Sturm, E., Genzel, R., Moorwood, A., and Sternberg, A. (1998b). ISO-SWS Observations of NGC 1068. *Astrophys. Sp. Sci.*, 248:217–224.
- Lynds, R. and Toomre, A. (1976). On the interpretation of ring galaxies: the binary ring system II Hz4. *Astrophys. J.*, 209:382–388.
- Macchetto, F., Capetti, A., Sparks, W., Axon, D., and Boksenberg, A. (1994). HST/FOC imaging of the narrow-line region of NGC 1068. *Astrophys. J.*, 435:L15–L18.
- Madden, S., Sauvage, M., and Vigroux, L. et al. (1999a). Nature of Mid-IR Emission in Low Metallicity Dwarf Galaxies. *Astron. Astrophys.*, en préparation.
- Madden, S., Vigroux, L., and Sauvage, M. (1997). Mid-infrared observations of early-type galaxies. *Extragalactic Astronomy in the Infrared. Edited by G. A. Mamon, Trinh Xuan Thuan, and J. Tran Thanh Van. Paris: Editions Frontieres*, pages 229–235.
- Madden, S., Vigroux, L., and Sauvage, M. (1999b). The mid-infrared emission from early-type galaxies. *ISO Conference: The Universe as seen by ISO, ESA Special Publications series (SP-427)*.
- Magain, P., Courbin, F., and Sohy, S. (1998). Deconvolution with correct sampling. *Astrophys. J.*, 494:L472–L477.
- Mathis, J. (1990). Interstellar dust and extinction. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 28:37–70.

- Mattila, K., Lemke, D., Haikala, L., Laureijs, R., Léger, A., Lehtinen, K., Leinert, C., and Mezger, P. (1996). Spectrophotometry of UIR bands in the diffuse emission of the galactic disk. *Astron. Astrophys.*, 315:L317–L320.
- Miley, G., Neugebauer, G., Soifer, B., Clegg, P., Harris, S., Rowan-Robinson, M., and Young, E. (1984). A 25 micron component in 3C 390.3. *Astrophys. J.*, 278:L79–L81.
- Mirabel, I., Booth, R., Johansson, L., Garay, G., and Sanders, D. (1990). CO(1-0) emission from luminous infrared galaxies in the southern hemisphere. *Astron. Astrophys.*, 236:327–332.
- Mirabel, I., Laurent, O., Sanders, D., Sauvage, M., Tagger, M., Charmandaris, V., Vigroux, L., Gallais, P., Cesarsky, C., and Block, D. (1999). A barred spiral at the centre of the giant elliptical radio galaxy Centaurus A. *Astron. Astrophys.*, 341:667–674.
- Mirabel, I., Lutz, D., and Maza, J. (1991). The Superantennae. *Astron. Astrophys.*, 243:367–372.
- Mirabel, I., Vigroux, L., Charmandaris, V., Sauvage, M., Gallais, P., Tran, D., Cesarsky, C., Madden, S., and Duc, P.-A. (1998). The dark side of star formation in the Antennae galaxies. *Astron. Astrophys.*, 333:L1–L4.
- Moorwood, A., Lutz, D., Oliva, E., Marconi, A., Netzer, H., Genzel, R., Sturm, E., and De Graauw, T. (1996). 2.5–45 μ m SWS spectroscopy of the Circinus Galaxy. *Astron. Astrophys.*, 315:L109–L112.
- Moran, E. and Lehnert, M. (1997). The Complex Broadband X-Ray Spectrum of the Starburst Galaxy M82. *Astrophys. J.*, 478:172–181.
- Morganti, R., Sadler, E., Oosterloo, T., Pizella, A., and Bertola, F. (1997). The HI-rich elliptical galaxy NGC 5266: An old merger remnant? *Publ. Astron. Soc. Australia*, 14:89–91.
- Mulchaey, J., Myshotzky, R., and Weaver, K. (1992). Hard X-ray tests of the unified model for an ultraviolet-detected sample of Seyfert 2 galaxies. *Astrophys. J.*, 399:L69–L72.
- Nikola, T., Genzel, R., Herrmann, F., Madden, S., Poglitsch, A., Geis, N., Townes, C., and Stacey, G. (1998). [CII] Emission from NGC 4038/9 (the “Antennae”). *Astrophys. J.*, 504:749–760.
- Norris, R. (1988). The double radio nucleus of Arp 220. *Mon. Not. R. astr. Soc.*, 230:345–351.
- Okumura, K. (1998). ISOCAM PSF report. *ESA report*.

- Oliva, E., Marconi, A., Moorwood, A., Drapatz, S., Lutz, D., and Sturm, E. (1999). Infrared spectroscopy of young supernova remnants heavily interacting with the interstellar medium. I. Ionized species in RCW 103. *Astron. Astrophys.*, 343:943–952.
- Oliva, E. and Moorwood, A. (1990). Detection of forbidden Si VI 1.962 microns and new observations of infrared H, forbidden Fe II, and H₂ line emission in the Seyfert galaxy NGC 1068. *Astrophys. J.*, 348:L5–L8.
- Onaka, T., Yamamura, I., Tanabe, T., Roellig, T., and Yuen, L. (1996). Detection of the Mid-Infrared Unidentified Bands in the Diffuse Galactic Emission by IRTS. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 48:L59–L63.
- Papadopoulos, P. and Seaquist, E. (1999). The State of the Molecular Gas in a Luminous Starburst/Seyfert 2 Galaxy: NGC 1068 Revisited. *Astrophys. J.*, 516:114–126.
- Pier, E. and Krolik, J. (1992). Infrared spectra of obscuring dust tori around active galactic nuclei. I - Computational method and basic trends. *Astrophys. J.*, 399:L23–L26.
- Pérez García, A., Rodríguez Espinosa, J., and Santolaya Rey, A. (1998). The mid-infrared spectral energy distribution of Seyfert galaxies. *Astrophys. J.*, 500:685–692.
- Puget, J. and Léger, A. (1989). A new component of the interstellar matter - Small grains and large aromatic molecules. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 27:161–198.
- Quillen, A., de Zeew, P., Phinney, E., and Phillips, T. (1992). The kinematics of the molecular gas in Centaurus A. *Astrophys. J.*, 391:121–136.
- Rees, M. (1984). Black Hole Models for Active Galactic Nuclei. *Astron. Astrophys.*, 22:471–506.
- Rieke, G. and Lebofsky, M. (1979). Infrared emission of extragalactic sources. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 17:477–511.
- Rigopoulou, H., Spoon, H., Genzel, R., Lutz, D., Moorwood, A., and Tran, Q. (1999). A large mid-infrared spectroscopic and near-IR imaging survey of ULIRGs: their nature and evolution. *Astron. J.*, December, in press.
- Roche, P., Aitken, D., Smith, C., and Ward, M. (1991). An atlas of mid-infrared spectra of galaxy nuclei. *Mon. Not. R. astr. Soc.*, 248:606–629.
- Rodríguez Espinosa, J., Rudy, R., and Jones, B. (1986). Extended nonnuclear infrared emission from Seyfert galaxies. *Astrophys. J.*, 309:76–79.
- Rodríguez Espinosa, J., Rudy, R., and Jones, B. (1987). Star formation in Seyfert galaxies. *Astrophys. J.*, 312:L555–L565.

- Rouan, D., Rigaut, F., Alloin, D., Doyon, R., Lai, O., Crampton, D., Gendron, E., and Arsenault, R. (1998). Near-IR images of the torus and micro-spiral structure in NGC1068 using adaptive optics. *Astron. Astrophys.*, 339:687–692.
- Roussel, H., Vigroux, L., and Sauvage, M. (1999). The relationship between star formation rates and mid-infrared emission in galactic disks. *Astron. Astrophys.*, en préparation.
- Rowan-Robinson, M. and Crawford, J. (1989). Models for infrared emission from IRAS galaxies. *Mon. Not. R. astr. Soc.*, 238:523–558.
- Rybicki, G. and Lightman, A. (1979). *Radiative Processes in Astrophysics*. Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Rydbeck, G., Wiklind, T., Cameron, M., Wild, W., Eckart, A., Genzel, R., and Rothmel, H. (1993). High resolution (C-12)O(2-1) observations of the molecular gas in Centaurus A. *Astron. Astrophys.*, 270:L13–L16.
- Sandage, A. and Tammann, G. (1975). Steps toward the Hubble constant. V - The Hubble constant from nearby galaxies and the regularity of the local velocity field. *Astrophys. J.*, 196:313–328.
- Sanders, D. and Mirabel, I. (1996). Luminous Infrared Galaxies. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 34:749–797.
- Sanders, D., Scoville, N., and Soifer, B. (1991). Molecular gas in luminous infrared galaxies. *Astrophys. J.*, 370:158–171.
- Sanders, D., Soifer, B., Elias, J., Madore, B., Matthews, K., Neugebauer, G., and Scoville, N. (1988). Ultraluminous infrared galaxies and the origin of quasars. *Astrophys. J.*, 325:74–91.
- Satyapal, S., Watson, D., Pipher, W., Forrest, J., Fisher, J., Greenhouse, M., Smith, H., and Woodward, C. (1999). Probing the Dust-enshrouded Regions of the Interacting Galaxy System Arp 299:A Near-Infrared Study. *Astrophys. J.*, 516:704–715.
- Sauvage, M., Blommaert, J., Boulanger, F., Cesarsky, D., and Cesarsky, C.J. et al. (1996). ISOCAM mapping of the Whirlpool galaxy M51. *Astron. Astrophys.*, 315:L89–L92.
- Schmidt, M. (1963). 3C 273: a star-like object with large red-shift. *Nature*, 197:1040–1040.
- Schreiber, N. (1999). *Near-infrared imaging spectroscopy and mid-infrared spectroscopy of M82: revealing the nature of star formation activity in the archetypal starburst galaxy*. PhD thesis, Universität München.
- Schulz, B., Clavel, J., Altieri, B., Barr, P., Claes, P., Heras, A., Leech, K., Metcalfe, L., and Salama, A. (1999). Spectrophotometry and imaging of AGNs from 2.5 to 11.6 μm . *SP-427-The Universe as seen by ISO*, 2:965–968.

- Scoville, N., Evans, A., Dinshaw, N., Thompson, R., Rieke, M., Schneider, G., Low, F., Hines, D., Stobie, B., Becklin, E., and Epps, H. (1998). NICMOS Imaging of the Nuclei of Arp 220. *Astrophys. J.*, 492:L107–L110.
- Scoville, N., Matthews, K., Carico, D., and Sanders, D. (1988). The stellar bar in NGC 1068. *Astrophys. J.*, 327:L61–L64.
- Scoville, N., Yun, M., and Bryant, P. (1997). Arcsecond Imaging of CO Emission in the Nucleus of Arp 220. *Astrophys. J.*, 484:702–719.
- Seyfert, C. (1943). Nuclear emission in spiral nebulae. *Astrophys. J.*, 97:28–40.
- Siebenmorgen, R., Starck, J., Sauvage, M., Cesarsky, D., Blommaert, J., and Ott, S. (1998). ISOCAM Data Users Manual-Version 4.0 (SAI/95-222/Dc).
- Slipher, V. (1917). The spectrum and velocity of the nebula N.G.C. 1068 (M 77). *Bulletin / Lowell Observatory*, 80:59–62.
- Sloan, G., Hayward, T., Allamandola, L., Bregman, J., Devito, B., and Hudgins, D. (1999). Direct Spectroscopic Evidence for Ionized Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Interstellar Medium. *Astrophys. J.*, 513:L65–L68.
- Smith, C., Aitken, D., and Roche, P. (1989). The nature of the infrared luminous galaxies Arp 220 and NGC 6240. *Mon. Not. R. astr. Soc.*, 241:425–431.
- Smith, H., Lonsdale, C., and Lonsdale, C. (1998a). The Starburst-AGN Connection. II. The Nature of Luminous Infrared Galaxies as Revealed by VLBI, VLA, Infrared, and Optical Observations. *Astrophys. J.*, 492:137–172.
- Smith, H., Lonsdale, C., Lonsdale, C., and Diamond, P. (1998b). A Starburst Revealed—Luminous Radio Supernovae in the Nuclei of Arp 220. *Astrophys. J.*, 493:L17–L21.
- Soifer, B., Boehmer, L., Neugebauer, G., and Sanders, D. (1989). The IRAS Bright Galaxy Sample. IV - Complete IRAS observations. *Astron. J.*, 98:766–797.
- Soifer, B., Neugebauer, G., and Houck, J. (1987a). The IRAS view of the extragalactic sky. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 25:187–230.
- Soifer, B., Sanders, D., Madore, B., Neugebauer, G., Danielson, G., Elias, J., Lonsdale, C., and Rice, W. (1987b). The IRAS bright galaxy sample. II - The sample and luminosity function. *Astrophys. J.*, 320:238–257.
- Spinoglio, L., Malkan, M., Rush, B., Carrasco, L., and Recillas-Cruz, E. (1995). Multiwavelength Energy Distributions and Bolometric Luminosities of the 12 Micron Galaxy Sample. *Astrophys. J.*, 453:616–633.
- Stanford, S., Sargent, A., Sanders, D., and Scoville, N. (1996). CO aperture synthesis of NGC 4038/39 (ARP 244). *Astrophys. J.*, 349:492–496.

- Starck, J.-L., Abergel, A., Aussel, H., Sauvage, M., Gastaud, R., Claret, A., Désér, F.-X., Delattre, C., and Pantin, E. (1999). ISOCAM data processing. *Astro. Astrophys. Suppl. Ser.*, 134:135–148.
- Starck, J.-L., Murtagh, F., and Bijaoui, A. (1998). *Image processing and data analysis. The multiscale approach*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Tacconi, L., Genzel, R., Blietz, M., Cameron, M., and Harris, A.I. and Madden, S. (1994). The nature of the dense obscuring material in the nucleus of NGC 1068. *Astrophys. J.*, 426:215–233.
- Telesco, C. (1988). Enhanced star formation and infrared emission in the centers of galaxies. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 26:343–376.
- Telesco, C., Becklin, E., Wynn-Williams, C., and Harper, D. (1984). A luminous 3 kiloparsec infrared disk in NGC 1068. *Astrophys. J.*, 282:427–435.
- Terlevich, R., Tenorio-Tagle, G., Rozyczka, M., Franco, J., and Melnick, J. (1995). The starburst model for active galactic nuclei-II. The nature of the lag. *Mon. Not. R. astr. Soc.*, 272:198–212.
- Toomre, A. and Toomre, J. (1972). Galactic Bridges and Tails. *Astrophys. J.*, 178:623–666.
- Tran, D. (1998). *Emission du milieu interstellaire local et extragalactique dans l'infrarouge moyen: L'apport d'ISOCAM*. PhD thesis, Université de Paris XI.
- Tresh-Fienberg, R., Fazio, G., Gezari, D., Lamb, G., Shu, P., Hoffmann, W., and McCreight, C. (1987). Structure in the nucleus of NGC 1068 at 10 microns. *Astrophys. J.*, 312:542–554.
- Van Buren, D. and Greenhouse, M. (1994). A more direct measure of supernova rates in starburst galaxies. *Astrophys. J.*, 431:640–644.
- van der Werf, P., Genzel, R., Krabbe, A., Blietz, M., Lutz, D., Drapatz, S., Ward, M., and Forbes, D. (1993). Near-infrared line imaging of NGC 6240 - Collision shock and nuclear starburst. *Astrophys. J.*, 405:522–537.
- Varnas, S., Bertola, F., Galleta, G., Freeman, K., and Carter, D. (1987). NGC 5266 - An elliptical galaxy with a dust ring. *Astrophys. J.*, 313:69–88.
- Veilleux, S., Kim, D.-C., Sanders, D., Mazzarella, J., and Soifer, B. (1995). Optical Spectroscopy of Luminous Infrared Galaxies. II. Analysis of the Nuclear and Long-Slit Data. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 98:171–217.
- Verstraete, L., Puget, J., Falgarone, E., Drapatz, S., Wright, C., and Timmermann, R. (1996). SWS spectroscopy of small grain features across the M17-Southwest photodissociation front. *Astron. Astrophys.*, 315:L337–L340.

- Vigroux, L. (1997). ISOCAM observations of normal galaxies. *Extragalactic Astronomy in the Infrared*. Edited by G. A. Mamon, Trinh Xuan Thuan, and J. Tran Thanh Van. Paris: Editions Frontieres, pages 63–76.
- Vigroux, L., Charmandaris, V., Gallais, P., Laurent, O., Madden, S., Mirabel, I., Roussel, H., Sauvage, M., and Tran, D. (1999). ISOCAM observations of galaxies. *ISO Conference: The Universe as seen by ISO*, ESA Special Publications series (SP-427).
- Vorontsov-Velyaminov, B. (1959). Atlas and catalog of interacting galaxies. 1959, Sternberg Institute, Moscow State University. *Atlas and catalog of interacting galaxies*.
- Whitmore, B. and Schweizer, F. (1996). Hubble space telescope observations of young star clusters in NGC-4038/4039, 'the antennae' galaxies. *Astron. J.*, 109:960–980.
- Wynn-williams, C. and Becklin, E. (1986). Infrared and radio emission from II Zw 40 and other blue dwarf galaxies. *Astrophys. J.*, 308:620–626.
- Wynn-williams, C., Hodapp, K.-W., Joseph, R., Eales, S., Becklin, E., Mclean, I., Simons, D., and Wright, G. (1991). Infrared emission regions in the interacting galaxy system arp 299. *Astrophys. J.*, 377:426–433.
- Yamamura, I., de Jong, T., Justtanont, K., Cami, J., and Waters, L. (1998). Spectroscopic Study of Carbon Stars with the ISO-SWS. *Astrophys. Sp. Sci.*, 255:351–357.
- Yun, M., Ho, P., and Lo, K. (1993). HI streamers around M82 - Tidally disrupted outer gas disk. *Astrophys. J.*, 411:L17–L20.
- Zhao, J.-H., Anantharamaiah, K., Goss, W., and Viallefond, F. (1997). High-density, compact h ii regions in the starburst galaxies ngc 3628 and ic 694: High-resolution vla observations of the h92 alpha radio recombination line. *Astrophys. J.*, 482:186–202.
- Zhou, S., Wynn-Williams, C., and Sanders, D. (1993). Imaging of luminous infrared galaxies at 3.4 microns. *Astrophys. J.*, 409:149–154.
- Zwicky, F. (1941). *Applied mechanics and related subjects*, Th. v. Kármán Anniversary volume:137.
- Zwicky, F. (1953). *Physics Today*, 6:7.

RÉSUMÉ

Cette thèse est consacrée à l'étude des galaxies à noyau actif et à sursauts de formation d'étoiles dans l'infrarouge moyen entre 3 et $16\mu\text{m}$ avec l'instrument ISOCAM. L'étude de prototypes de galaxies proches tels que NGC 1068 et M 82 permet de définir trois composantes spectrales. D'une part, les régions de formation d'étoiles se caractérisent par (1) des bandes infrarouges à 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 et $12.7\mu\text{m}$ provenant de régions de photodissociation et par (2) un continuum à $15\mu\text{m}$ produit par les très petits grains dans les régions HII. Je montre d'autre part que les spectres de noyaux actifs présentent (3) un fort continuum se différenciant de celui des régions HII par une contribution importante entre 3 et $10\mu\text{m}$ émise par de la poussière chauffée jusqu'à des températures de l'ordre de 1000 K. Je présente deux diagrammes de diagnostics basés sur les propriétés spectrales de ces trois composantes qui permettent de séparer les galaxies dominées par les noyaux actifs de celles dominées par les flambées de formation d'étoiles. Dans le cas des galaxies en interaction, je montre que des régions de formation d'étoiles dominant l'émission à $15\mu\text{m}$ peuvent se produire en dehors des noyaux lors de la collision comme dans la galaxie Cartwheel et les Antennes. Les spectres infrarouges des galaxies ultralumineuses m'ont également permis de définir deux prototypes dominés soit par l'activité de formation d'étoiles dans le cas d'Arp 220 soit par le noyau actif dans le cas des Super-Antennes (IRAS 19254-7245). J'explique comment ce diagramme et ces critères de sélection évoluent en fonction de différents décalages spectraux. Enfin, je montre comment on peut développer de nouveaux diagnostics basés sur des filtres de l'instrument IRAC installé à bord du prochain satellite infrarouge SIRTf.

Mots-clés : galaxies - formation d'étoiles - noyaux actifs de galaxies - infrarouge - poussières

ABSTRACT

This thesis is dedicated to the study of starburst galaxies and active galactic nuclei (AGNs) in the mid-infrared between 3 and $16\mu\text{m}$ with the ISOCAM instrument. The study of nearby prototypical galaxies such as NGC 1068 and M 82 lead me to decompose the emission into three components. The star forming regions are characterized by (1) the infrared bands at 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 and $12.7\mu\text{m}$ originating from the photodissociation regions and also by (2) a continuum at $15\mu\text{m}$ produced by the very small grains in HII regions. I show that AGNs have (3) strong continuum with an important contribution between 3 and $10\mu\text{m}$ arising from hot dust heated to high temperatures of the order of 1000 K. I present two diagnostic diagrams based on the spectral properties of the three components allowing me to distinguish AGNs from starburst regions. In interacting galaxies, I show that some extra-nuclear regions harboring starburst activity can dominate the emission at $15\mu\text{m}$ as in the Cartwheel and the Antennae galaxies. Using mid-infrared spectral features, I also define two prototypes of ultraluminous galaxies dominated either by starburst activity in the case of Arp 220 or by the AGN in the Super-Antennae galaxy (IRAS 19254-7245). I explain how this diagram and the selection criteria evolve according to redshift. Finally, I show how we can develop new diagnostics using filters of the IRAC instrument on board the next infrared space observatory SIRTf.

Key words: galaxies - starburst - active galactic nuclei - infrared - dust