HAL
open science

De la Poussière Interstellaire, de l'Emission Infrarouge des Galaxies, et des Mesures du rayonnement cosmologique à 3K

Francois-Xavier Désert

To cite this version:

Francois-Xavier Désert. De la Poussière Interstellaire, de l'Emission Infrarouge des Galaxies, et des Mesures du rayonnement cosmologique à 3K. Astrophysique [astro-ph]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1999. tel-00009703

HAL Id: tel-00009703

https://theses.hal.science/tel-00009703v1

Submitted on 7 Jul 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MÉMOIRE

présenté à

L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER de GRENOBLE

pour obtenir le

DIPLOME D'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

spécialité : **Astrophysique et techniques spatiales**

par

François–Xavier Désert

De la Poussière Interstellaire, de l'Emission Infrarouge des Galaxies, et des Mesures du rayonnement cosmologique à 3K

Soutenu le 11 juin 1999, devant le jury composé de :

MM.	**Pierre Encrenaz**	Rapporteurs
	James Lequeux	
	Laurent Vigroux	
	Guy Pelletier	Examinateurs
	Jean–Loup Puget	

Laboratoire d'Astrophysique, Observatoire de Grenoble, France

Résumé

Je détaille dans ce mémoire l'ensemble de mes travaux astrophysiques effectués entre 1986 et 1999, et je les replace dans le contexte astrophysique actuel. Dans une première partie, je discute de la poussière interstellaire dans son rôle de transformateur de photons ultraviolets et visibles venant des étoiles en de multiples photons infrarouges. Si les gros grains de 100 nanomètres de diamètre étaient attendus en émission dans l'infrarouge lointain, les observations par les satellites IRAS puis ISO ont montré ces quinze dernières années la présence de particules solides plus petites (PAH et autre très petits grains de taille comprise entre 0.5 et 5 nm) qui sont importantes pour comprendre l'émission dans l'infrarouge moyen (entre 2 et 80 μm) de notre galaxie. Nous montrons une modélisation des processus stochastiques d'émission de ces petits grains et comment la poussière se répartit dans le milieu interstellaire local. Dans une seconde partie, nous montrons comment la poussière affecte globalement l'énergétique des galaxies. En particulier, les relevés profonds avec la caméra ISOCAM nous permettent de trouver une nouvelle population de galaxies à des redshifts de 0.5 à 1 dont les comptages trahissent une forte évolution par rapport aux galaxies locales. Nous montrons comment le fond diffus extragalactique infrarouge et submillimétrique, détecté pour la première fois grâce à COBE, est un des témoins de la formation de galaxies à des redshifts compris entre 1 et 5. Nous décrivons enfin le travail d'instrumentation sur le photomètre DIABOLO qui nous a permis de détecter avec une grande résolution angulaire, l'effet Sunyaev-Zel'dovich produit par le gaz chaud des amas de galaxies, traversé par les photons du rayonnement fossile à 3 K. Nous montrons comment les anisotropies de ce rayonnement constituent la meilleure empreinte sur l'Univers primordial, que nous puissions observer. Si COBE a définitivement montré la classe de modèles de Big Bang acceptables (inflation, matière froide sombre), le futur satellite PLANCK, limité par les bruit cosmiques inhérents, devraient en 2007 nous dire dans quelle géométrie et avec quel contenu en matière, l'Univers existe.

Abstract

In this report I present the whole set of my astrophysical studies done between 1986 and 1999, and I put them in the present astrophysical context. In a first part, I discuss the role of intestellar dust in redistributing UV and visible photons coming from stars into infrared photons. If the far infrared emission from 100 nanometre big grains was expected, the observations by the IRAS and ISO satellites have shown the presence of smaller solid particles (PAH and other very small grains of size between 0.5 and 5 nm) that are important for understanding the mid infrared emission of our galaxy (between 2 and 80 μm). We show a modeling of the stochastic emission process of these small grains and how the dust is spatially distributed in the local interstellar medium. In a second part, we show how the dust globally transforms the energetics of galaxies. In particular, deep surveys with the camera ISOCAM reveal a new population of galaxies with redshifts between 0.5 and 1, the counts of which show a high evolution rate relative to local galaxies. We show how the diffuse extragalactic infrared and submillimetre background, detected for the first time with COBE, is an evidence for galaxy formation at redshifts between 1 and 5. Finally, we describe the instrumentation work that was done on the DIABOLO photometer that allows us to detect with a high angular resolution the Sunyaev-Zel'dovich effect, due to the scattering, off the hot gas in clusters of galaxies, of the 3 K cosmic microwave background. We show how the anisotropies of this radiation yield the best observable imprint on the primordial Universe. If COBE definitely gave us the class of Big Bang models that are valid (inflation, cold dark matter), the future PLANCK satellite, limited by natural cosmic noise only, should tell us, in 2007, the geometry and physical content with which the Universe exists.

A Tania

Allez tranquillement parmi le vacarme et la hâte, et souvenez-vous de la paix qui peut exister dans le silence.
Sans aliénation, vivez autant que possible en bons termes avec toutes personnes.
Dites doucement votre vérité; écoutez les autres, même le simple d'esprit et l'ignorant; ils ont eux aussi leur histoire.
Soyez vous-même.
Prenez avec bonté le conseil des années, en renonçant avec grâce à votre jeunesse.
Fortifiez une puissance d'esprit pour vous protéger en cas de malheur soudain. Mais ne vous chagrinez pas avec vos chimères. De nombreuses peurs naissent de la fatigue et de la solitude.
Au delà d'une discipline saine, soyez doux avec vous–même.
Vous êtes un enfant de l'univers, pas moins que les arbres et les étoiles; vous avez le droit d'être ici.
Et qu'il vous soit clair ou non, l'univers se déroule sans doute comme il le devrait.
Avec toutes ses perfidies, ses besognes fastidieuses et ses rêves brisés, le monde est pourtant beau. Prenez attention. Tâchez d'être heureux.

Baltimore 1692; anonyme (extraits)

Mon âme est tellement ouverte à toutes sortes d'idées, de goûts et de sentiments; elle reçoit si avidement tout ce qui se présente!... – Et pourquoi refuserait-elle les jouissances qui sont éparses sur le chemin difficile de la vie? Elles sont si rares, si clair–semées, qu'il faudrait être fou pour ne pas s'arreter, se détourner même de son chemin pour cueillir toutes celles qui sont à notre portée. Il n'en est pas de plus attrayante, selon moi, que de suivre ses idées à la piste, comme le chasseur poursuit le gibier, sans affecter de tenir aucune route. Aussi, lorsque je voyage dans ma chambre, je parcours rarement une ligne droite: je vais de ma table vers un tableau qui est placé dans un coin; de là je pars obliquement pour aller à la porte; mais, quoique en partant mon intention soit bien de m'y rendre, si je rencontre mon fauteuil en chemin, je ne fais pas de façon et je m'y arrange tout de suite.

Voyage autour de ma Chambre, 1794
Xavier de Maistre (Edition José Corti)

Coordonnées

François–Xavier Désert

Laboratoire d'Astrophysique, Observatoire de Grenoble, BP 53,
414 rue de la piscine, 38041 Grenoble Cedex 9 FRANCE
Tel: 04 7663 5512, Fax : 04 7644 8821
email: Francois-Xavier.Desert@obs.ujf-grenoble.fr
Internet: http://www-laog.obs.ujf-grenoble.fr/~desert

16 août 1999

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier Pierre Encrenaz, James Lequeux, Guy Pelletier, Jean–Loup Puget, et Laurent Vigroux d'avoir accepté de participer au jury de cette soutenance.

Je remercie l'accueil chaleureux du Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire de Grenoble à mon arrivée il y a deux ans.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers Jean–Loup Puget, Alain Benoît, Alain Abergel, François Boulanger, Alain Castets, Catherine et Diego Césarsky, Noël Coron, Jacques Delabrouille, Michel Dennefeld, Christophe Dupraz, Gilles Duvert, Pierre Encrenaz, Mike Hauser, Martin Giard, Mayo Greenberg, Peter Jenniskens, Jean–Michel Lamarre, Alain Léger, James Lequeux, Michel Pérault, Christian Perrier, Guy Pelletier, Steve Shore, Laurent Vigroux, et bien d'autres qui m'ont montré que l'astrophysique est une science rigoureuse mais aussi humaine.

Je tiens à remercier tous les étudiants en thèse et autres stagiaires qui par leurs questions (souvent pertinentes) ont su me montrer que la science en général, et l'astrophysique en particulier, se construit par du savoir–faire mais aussi par du faire–savoir (le bât blesse souvent par là).

Je salue Laura, pour qui *le chemin est bordé de cailloux et d'orteils*, Karen pour avoir vu au plafond *une étoile d'araignée* et Sophie pour avoir récemment *slouffé ses trois bougies.*

Table des matières

Résumé **1**

Abstract **2**

Remerciements **5**

Table des matières **7**

Introduction **9**

1 Étude de la poussière interstellaire **11**
1.1 Extinction et émission des poussières interstellaires 11
1.1.1 Motivation du modèle 11
1.1.2 Description du modèle 12
1.1.3 Les nouvelles observations du milieu galactique 13
1.2 Les bandes diffuses interstellaires 16
1.3 Recherche de nuages moléculaires 17
1.4 Distribution spatiale de la matière interstellaire 17

2 Études des galaxies dans le domaine infrarouge **21**
2.1 L'observation de la poussière dans les galaxies 21
2.2 ISOCAM 23
2.2.1 Étalonnage d'ISOCAM 23
2.2.2 L'apport d'ISOCAM pour la physique des galaxies 25
2.2.3 Les relevés profonds de galaxies avec ISOCAM 26
2.3 Le fond diffus infrarouge et submillimétrique 27
2.4 Prospective 31

3 Le rayonnement cosmologique à 3 K **35**
3.1 Le modèle le plus simple d'Univers 35
3.2 Amas de galaxies et effet Sunyaev–Zel'dovich 37

3.2.1 A quoi sert l'effet SZ? 38
3.2.2 Les comptages de sources SZ 39
3.3 Diabolo 41
3.4 Prospective 42
3.4.1 Matrice de bolomètres 42
3.4.2 Mesure des anisotropies du CMB 43

Liste de Publications et Bibliographie Générale **45**

Annexe: Tirés à part **60**

Introduction

Ce mémoire est une synthèse des travaux que j'ai effectués dans plusieurs laboratoires: Groupe de Radioastronomie–ENS–DEMIRM Paris, Goddard Space Flight Center Greenbelt Md USA, Université de Leiden, DEMIRM–Observatoire de Meudon, Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) d'Orsay, Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire de Grenoble. C'est principalement la periode IAS 1991-1997 qui a vu l'aboutissement de nombreux projets utilisant COBE, ISO et DIABOLO, auxquels j'ai participé. Je ne saurais trop avouer que la recherche moderne est un travail d'équipe. Sans la participation de nombreuses personnes, aucune contribution individuelle n'est vraiment valable. L'IAS a été un creuset d'idées, de techniques, et de ressources humaines particulièrement imposant. Le fait que l'IAS ait pu réussir à convaincre l'ESA de la valeur du projet PLANCK HFI est une preuve flagrante de l'efficacité de ce creuset. Le présent mémoire n'est qu'un bout de la lorgnette sur des activités multi-labo et multi-nationales qui couvrent grosso-modo l'astronomie spatiale infrarouge et (sub)millimétrique.

L'effet "négatif" des poussières interstellaires sur la propagation du rayonnement des étoiles a depuis longtemps été observé: certaines régions noires, dépourvues d'étoiles (on parlait déjà de masse manquante!) ont été associées à la présence de nuages de gaz et de poussières qui s'interposent entre l'observateur et les sources d'émission. C'est principalement la poussière, interstellaire donc, qui est la source de l'extinction de la lumière. Cette extinction va décroissant lorsqu'on la mesure dans le domaine ultraviolet (UV), visible et infrarouge (IR), c'est à dire lorsque la longueur d'onde augmente: on parle de rougissement de la lumière. Elle est constituée d'une part de diffusion (redistribution des angles sans changement de fréquence) et d'autre part d'absorption. Les grains de poussière sont chauffés (typiquement entre 10 et 1000 Kelvin) et émettent l'énergie absorbée dans l'IR (entre 1 et 1000 μm). La poussière a donc un rôle capital dans la redistribution de l'énergie lumineuse des galaxies. Ce n'est qu'avec le lancement du satellite IRAS (1985) et plus récemment celui de COBE (1990) puis d'ISO (1995) que l'émission IR (effet "positif" si l'on veut) des poussières galactiques et extragalactiques a pu être observée en détail. Un autre effet "négatif" des poussières, qui requiert donc également des études poussées, provient du rideau d'émission qu'elle provoque devant les sources et le fonds extragalactiques que

l'on voudrait observer. Nous y reviendrons au Chapitre 2 (Section 2.3, page 27). Nous pouvons dorénavant commencer notre périple à travers les poussières (pas plus grosses que les particules solides de la fumée de cigarette) jusqu'aux confins de l'Univers.

Chapitre 1

Étude de la poussière interstellaire

1.1 Modélisation simultanée de l'extinction et de l'émission des poussières interstellaires

1.1.1 Motivation du modèle

Le modèle, publié en 1990 [12], fut motivé par l'arrivée massive de données infrarouges (Iras et photometrie sol 3 et 8-13 μm). Mis à part Draine & Lee [100], très peu de modèles avaient essayé de présenter de façon cohérente l'émission et l'extinction des grains de poussière du milieu interstellaire diffus. Les grains à l'équilibre thermique à 15-20 K étaient prévus de longue date [169], confirmés par l'émission 100 μm des cirrus observée par Iras en tout point du ciel. Draine & Anderson [101] furent les premiers à proposer une modification sur les tailles de grains courramment admises afin de rendre compte de l'émission substantielle vue également par Iras à plus courte longueur d'onde (12-25-60 μm). On a pu croire que l'emission à courte longueur d'onde pourrait être expliquée par une variation *spatiale* du champs de rayonnement: localement, les étoiles chauffent plus fort les grains que le champ de rayonnement diffus. Mais les observations ont montré (ce fut assez lent pour convaincre les irréductibles) que, même loin des sources de chauffage, on trouve encore des grains apparemment sur–thermiques (i.e. à des températures plus grandes que l'équilibre thermique des grains ne le permet). L'idée de grains à variation *temporelle* (et non plus spatiale) de température remonte à Greenberg [118] qui l'utilisa pour favoriser la chimie sur les grains. Sellgren [172] puis Léger, Puget, & Boulanger [139, 161] et utilisèrent cette idée en tant que mécanisme majeur d'émission infrarouge à courte longueur d'onde (1 à 80 μm). Ce mécanisme avait déjà été pressenti par Andriesse [79] grâce à des observations de M17. Supposer une loi d'émissivité telle que les grains soient très chauds à l'équilibre thermique (une hypothèse de longue date dont le dernier avatar est le modèle des charbons de Papoular *et al.* [158]), ne parvient pas à expliquer les très

faible variations de couleur dans l'infrarouge moyen (cf. infra).

1.1.2 Description du modèle

Le calcul du chauffage impulsionnel des petits grains est fait par itération de matrices [2] et non plus par simulation Monte-Carlo [101]. Une approche analytique a depuis été trouvée par Guhathakurta & Draine [119]. Elle ne peut s'appliquer qu'au cas du calcul par photothermodissociation [8]. L'approche dans [12] a été de construire un modèle minimal avec des propriétés de grains simplifiées mais néanmoins suffisantes pour rendre compte quantitativement des observations de l'extinction et de l'émission par les grains du milieu diffus galactique. Nous avons créé de toute pièce des PAHs (molécules bidimensionnelles d'hydrocarbures polycycliques aromatiques), VSGs (très petits grains de carbone) et BGs (gros grains formés d'un cœur de silicate et de manteaux carbonés) dits "astronomiques" avec des lois d'émissivité déduites des observations et de quelques contraintes de laboratoire plutôt que "d'imposer à la nature" un type spécifique de grain comme le firent *e.g.* Greenberg [128], ou Mathis *et al.* [151] puis Draine & Lee [100] ou encore Rowan–Robinson [166].

La modélisation des PAHs ne faisait que reprendre le travail de Puget *et al.* [161]. Nous pensions que le rôle important des VSGs pour les bandes IRAS intermédiaires (25 and 60 μm) devait être souligné. Sans identification certaine des porteurs - on a supposé des grains carbonés à trois dimensions à fin de produire la bande d'absorption à 220 nm - les VSGs dont la température fluctue jusqu'à environ 150 K par chauffage impulsionnel, sont nénmoins responsables de 60 % (resp. 14 %) de l'émission à 60 (resp. 100) μm , dans le milieu diffus local, ce qui fausse toutes les estimations de température des grains (si on les suppose à l'équilibre thermique) utilisant le fameux rapport $R_{34} = F_\nu(60)/F_\nu(100)$, et ainsi la densité de colonne de poussière. Les variations de R_{34} des galaxies proches comme M 31 et M 33 sont très faibles alors que le champ de rayonnement change par un facteur d'au moins 10 du bord au centre. Les extra-galacticiens d'alors ne prêtèrent que très peu d'attention aux conséquences des VSGs sur la sous-estimation de la masse de gaz dans les galaxies.

A partir des données IRAS seules, deux conclusions fortes ont pu être tirées quant à la distribution spatiale des PAHs et VSGs par rapport aux gros grains:

1. D'après Boulanger *et al.* (1990) [90] et Bernard *et al.* (1992) [13], les variations de champ de rayonnement aux abords d'un nuage dense ne peuvent à elles seules rendre compte des variations *de conserve* des couleurs IRAS (R_{i4} où $i = 1, 2, 3$ sont les bandes IRAS 12, 25, 60 μm). Les grains qui fluctuent en température ont donc une abondance très variable près des nuages denses. Souvent surabondants sur l'enveloppe, ils disparaissent complètement au cœur des nuages à l'endroit même où apparaissent des molécules telles que CO,... (cf. *e.g.* Abergel *et al.* [76]). Dans

les nébuleuses par réflexion: Pleïades, NGC 2023, et NGC 7023, les PAHs et VSGs sont largement surabondants. Les VSGs sont bien une population distincte des gros grains et non pas seulement une queue de distribution.

2. L'observation de la Nebuleuse de Californie par Boulanger *et al.* [5] montre le comportement différent des VSGs et des PAHs. Les PAHs ne résistent pas au voisinage de l'étoile excitatrice alors que les VSGs y sont presque plus abondants que dans le milieu diffus local. Le comportement à 12 et 25 μm est différent, ce qui distingue bien en nature les porteurs (dans notre hypothèse PAHs et VSGs). On retrouve largement cette dichotomie dans les galaxies vues par IRAS.

1.1.3 Les nouvelles observations du milieu galactique

Des études IRAS postérieures au modèle précédemment cité ont montré que l'attribution d'une composante d'extinction à une seule composante d'émission (et réciproquement) n'allait pas de soi. Boulanger *et al.* [89] et Jenniskens & Désert [16] ne parviennent pas à conclure à une attribution univoque entre les particularités de l'extinction et de l'émission. D'autre part, Jenniskens *et al.* (1992) [14] montrent que la partie non-linéaire de l'extinction UV est peut-être liée à l'état d'ionisation des PAHs (et non seulement à leur abondance). Des études de chimie théorique (De Frees *et al.* 1993 [96]) montrent que la force d'oscillateur des bandes IR des PAHs (de petite taille) varie énormément avec l'état d'ionisation des PAHs. Des mesures en laboratoire par Verstraete & Léger (1992) [183] et Joblin *et al.* (1992) [131] montrent que les PAHs peuvent contribuer à la bosse à 220 nm (ou tout au moins à son élargissement?).

La détection grâce au photomètre ballon AROME de la raie à 3.3 μm en 1987 par Giard *et al.* [116] dans le milieu diffus interstellaire du plan galactique a plus tard été réobtenue par le satellite IRTS [178]. Les PAHs sont bien omniprésents dans le milieu diffus galactique. Les raies sont correlées avec le milieu diffus atomique et moléculaire et non les étoiles évoluées. Il y a également une émission diffuse continuum entre 3 et 5 μm (non dominée par la raie 3.3 μm) comme le montrent les premières données du photomètre DIRBE de COBE (Bernard *et al.* 1994 [18]). La figure 1.1 résume l'émission infrarouge des poussières interstellaires.

Les données rendues publiques en 1995 de DIRBE et surtout FIRAS de COBE ont permis de mesurer précisément pour la première fois le spectre submillimétrique de la poussière interstellaire (Boulanger *et al.* 1996 [27]). Les études détaillées récentes de Lagache *et al.* (1998 [136], 1999 [45]) confirment que le spectre de la poussière interstellaire associée au gaz HI peut être simplement caractérisé par une intensité de:

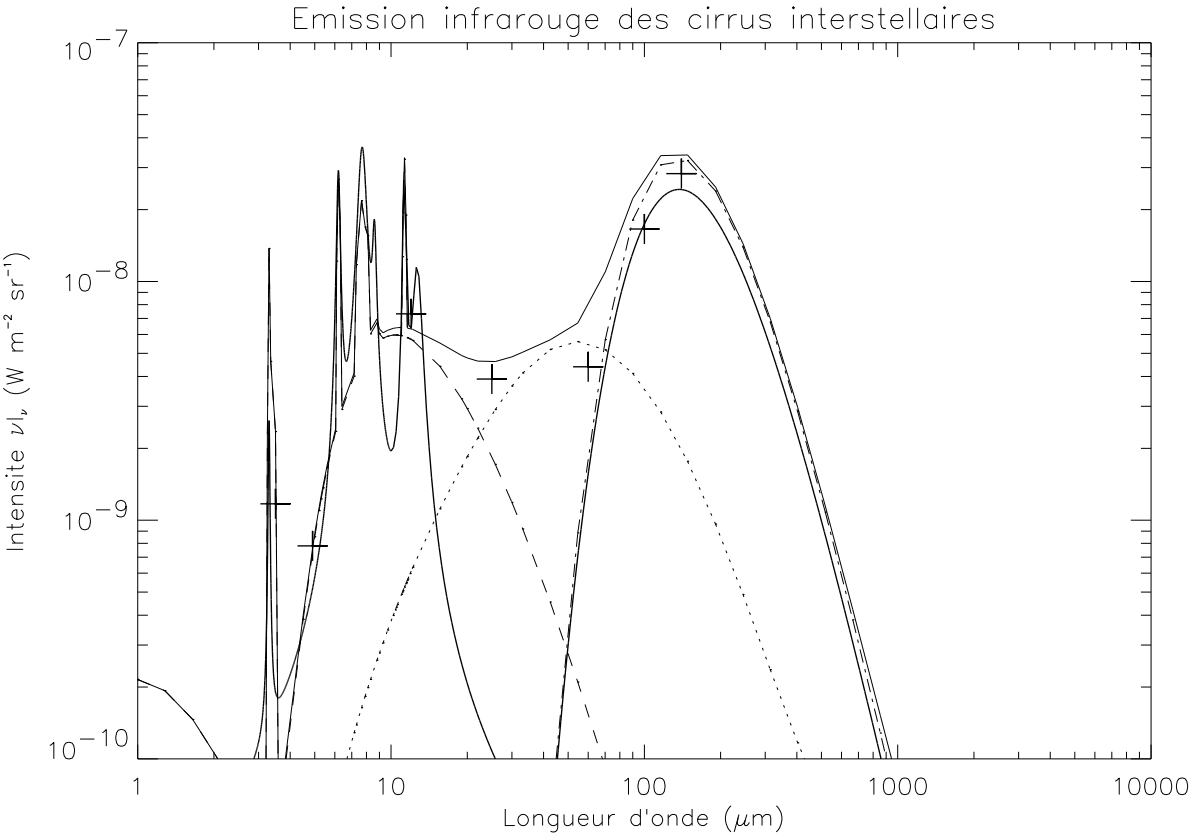

FIG. 1.1 – *Spectre infrarouge des poussières interstellaires. Les observations, croix et lignes* **en gras**, *sont normalisées à une densité de colonne de* 10^{20} *H cm*$^{-2}$ *d'hydrogène. La raie à 3.3* μm *provient de Giard et al. (1994) [117], les autres bandes sont des profils lorentziens calées sur les observations* ISOCAM *de* ρ *Oph par Boulanger et al. (1998) [88], les croix sont les mesures* DIRBE *du plan galactique par Bernard et al. [18] et enfin le spectre submillimétrique, résumé par l'équation 1.1, provient de* FIRAS *(Lagache et al. 1999 [45]). Le modèle en trait fin est exactement celui publié en 1990 [12]. Il se décompose de gauche à droite en l'émission des PAHs, des petits grains VSGs et des gros grains.*

$$\nu I_\nu = 8.7 \pm 0.9 \times 10^{-26} \left(\frac{\lambda}{250\,\mu\mathrm{m}}\right)^{-2} N_{HI}\, \nu B_\nu(17.5\,\mathrm{K})\,, \tag{1.1}$$

où B_ν est la fonction de Planck. C'est un peu le deuxième corps noir (certes modifié par la loi d'émissivité en ν^2) découvert par COBE, le premier étant le plus célèbre à 2.725 K. Le modele prédisait un spectre submm en accord avec les données IRAS qui se trouvent être un facteur 20% environ au dessus des données DIRBE. Mis à part cette correction d'étalonnage (que l'on peut compenser dans le modèle en augmentant l'albedo des gros grains d'autant, les mesures duquel sont imprécises), le spectre est très proche de celui observé (Fig. 1.1). La présence de deux composantes distinctes (graphite et silicates)

prédites dans le submm par les modèles de poussières cousins du modèle MRN [151] reste néanmoins compatible avec les données FIRAS, qui sont finalement peu discriminantes. Dans tous les cas la poussière diffuse possède une émissivité en ν^2, ce qui élimine les grains très poreux ou en forme d'aiguilles. Nous revenons sur ce spectre en section 2.3. D'autre part, l'ajout des voies à 140 et 240 μm de DIRBE (par rapport à IRAS) permet de confirmer que les grains émetteurs du submm sont bien à l'équilibre thermique (on les observe changer de température à l'approche de l'anneau moléculaire [174]) et *a contrario* les VSGs, qui ne sont pas à l'équilibre font une part importante du lointain infrarouge (12-80 μm).

Parmi la moisson de résultats ISO [130], nous ne parlerons pas de la chimie sur les grains et leurs glaces. Citons plutôt ici la mesure de spectres complets 5-17 μm par ISOCAM dans le diffus du voisinage solaire qui prouvent que les PAHs sont bien présents partout même en champ de rayonnment faible. Une raie à 12.8 μm (que l'on prenait auparavant pour la raie du Neon ionisé) semble indiquer des PAHs un peu plus hydrogénés que près des sources d'illumination forte. Les spectres à haute résolution spectrale SWS ne décomposent pas les raies des PAHs en sous-bandes multiples comme nous le pensions. En fait, Boulanger *et al.* [88] montrent que des lorentziennes larges s'ajustent très bien aux spectres (Fig. 1.1): c'est sans doute un effet de redistribution vibrationnelle interne et donc de durée de vie non nulle des niveaux vibrationnels qui sont à l'origine de la largeur intrisèque des raies. D'autre part il semble que les VSGs possèdent aussi un massif de raies autour de 7 μm , mais beaucoup plus faible que le continuum sous-jacent: les meilleurs endroits pour observer les VSGs sont les régions HII où les PAHs disparaissent. Dans M17, Verstraete *et al.* [184] montrent l'émergence d'une raie forte à 8.7 μm et d'une nouvelle raie à 11 μm . Aucune identification précise n'existe à ce jour pour les VSGs.

Le modèle d'extinction et d'émission des poussières interstellaires [12] a montré une résilience assez surprenante à l'épreuve des observations. Cela ne doit pas masquer l'utilité d'un approfondissement à la lumière des observations COBE et ISO en particulier, des mesures en laboratoire et d'autres considérations théoriques (*e.g.* les relations de Kramers-Krönig). La partie proche infrarouge en extinction (1 à 10 μm) est encore mal comprise et modélisée, de même que l'émission continuum 1 à 5 μm observée dans les nébuleuses par réflection et le plan galactique. La modélisation globale des nébuleuses par réflection n'a pas pu être achevée: gageons qu'elle n'en sera que plus difficile avec les nouvelles données ISO et caméra sol. Enfin, l'émission rouge étendue (*e.g.* [193]) est une autre composante d'émission (dans le domaine *visible* cette fois) que l'on trouve partout dans le milieu interstellaire. Il s'agit de fluorescence encore mal comprise sur les grains (lesquels?).

1.2 Les bandes diffuses interstellaires

Les bandes diffuses interstellaires (DIB) sont des raies faibles observées en absorption dans le domaine visible sur des lignes de visée stellaires (cf la revue de Herbig [127]). Aucune identification des quelques deux cents raies repertoriées à ce jour n'a été donnée. Ces raies ont une largeur plus grande que celle (Doppler) des espèces atomiques ou radicalaires et l'hypothèse d'un porteur moléculaire interstellaire est maintenant dominante. L'arrivée de détecteurs CCD nous a permis d'établir un catalogue systématique de ces raies avec une grande sensibilité [15]. La figure 1.2 donne une idée de la complexité du problème astrophysique. Des mesures plus récentes ont encore ajouté des dizaines de raies de plus en plus faibles à cette liste. On peut conjecturer que le spectre visible (au moins la partie rouge) est complètement couvert de ces raies. En revanche, l'absorption globale correspondante est négligeable: de l'ordre de quelques pour mille par unité de A_V. C'est peut-être ce qui explique la faiblesse des corrélations entre les DIBs et les motifs d'extinction interstellaire: nous avons seulement trouvé que la remontée de l'extinction UV non-linéaire nous semble anticorrélée avec l'abondance des DIBs [23], ce qui pourrait s'expliquer par le degré d'ionisation des porteurs. La nature moléculaire des porteurs est le mieux mise en évidence par les études à haute résolution spectrale et à grande sensibilité auxquelles nous avons pu participer grâce aux télescope 1.52 m de l'Observatoire de Haute–Provence, équipé du spectrographe AURÉLIE. En particulier, des structures de raies satellites des DIBs à 578.0 nm et 628.4 nm [15] (confirmées par [135]) et plus récemment à 585.0 nm [28] ont été mesurées. Les structures sont suggestives de modes de pliages du squelette carboné [15]. On s'attend à des transitions correspondantes dans le submillimétrique sans qu'aucun calcul quantitatif n'ait èté fait (nous pensons que c'est inobservable même par FIRST).

L'élargissement des DIBs semble être principalement dû à la durée de vie du niveau supérieur [15]. Récemment, Le Coupanec *et al.* (1999) [138] ont trouvé un élargissement supplémentaire de type rotationnel car il dépend de la température de rotation des PAHs, qui peut être suprathermique dans certains environnements. Enfin, mentionons juste que certaines DIBs ont été observées *en émission* dans la nébuleuse du Rectangle Rouge [171], et que cette émission ne semble pas liée à l'émission étendue rouge [134].

Dans le cadre de l'hypothèse PAH, selon Léger et d'Hendecourt (1985) [140] les cations sont des candidats prometteurs car ils sont abondants dans le milieu interstellaire et présentent des transitions dans le domaine visible. Les tentatives se résument pour l'instant à l'identification possible de quelques DIBs seulement [170, 141]. L'ensemble des DIBs provient donc vraisemblablement d'une famille probablement large et importante de PAHs qui est loin d'être caractérisée à l'heure actuelle. Des alternatives prometteuses sont aussi apparues, comme les fullerenes (C_{60}^+) [113] ou les chaines carbonées C_n^- [181].

1.3 Recherche de nuages moléculaires à haute latitude galactique

Les données IRAS couvrant tout le ciel, ainsi que les données HI, il fut tentant de trouver la composante moléculaire du milieu diffus local par une technique soustractive. En effet, les gros grains des deux composantes HI et $\overset{\prime\prime}{2}$, si elles contiennent en égale proportion des grains interstellaires, émettent à $100\,\mu$m , émission traçée par IRAS. En soustrayant la partie correlée au HI, on atteint les nuages moléculaires surtout à haute latitude galactique, qui sont donc situés à des distances typiques de 100 pc (3×10^{18} m), sans observer avec de couteux relevés CO. Une fois achevé le catalogue de nuages supposés moléculaires [7], nous avons entrepris de tester leur nature grâce à des observations CO [11]. Seulement 13% de ces nuages furent effectivement détectés. Nous avons conjecturé, principalement pour des nuages d'extinction faible ($A_V < 0.25$), qu'une composante $\overset{\prime\prime}{2}$ existait sans formation de CO. Un sous-produit de cette recherche IRAS, HI et CO est un nuage à vitesse radiale anormale observé en CO, dont la nature n'est pas élucidée [10].

La polémique sur la fraction exacte du ciel émettant dans la raie de CO n'a pas cessé depuis, la dernière estimation en date étant celle d'Hartmann *et al.* (1998) [121]. D'autre part, Reach *et al.* [163] a repris notre méthode en 1998 et l'a appliquée aux (meilleures) données de DIRBE et le nouveau survey HI de Hartmann & Burton [122]. Leur (meilleurs) résultats supplantent dorénavant notre ancienne recherche.

1.4 Distribution spatiale de la matière interstellaire

Les mesures IRAS nous ont donné accés à une résolution *et* une couverture angulaires sans précédent (2 minutes d'arc sur 4π steradians). Les deux sont nécessaires pour disposer d'une grande dynamique déchelle afin d'évaluer la distribution angulaire de la matière diffuse interstellaire. Cette distribution n'était jusque là connue que grâce aux traceurs moléculaires (CO en particulier) qui souffrent d'une chimie complexe et n'apparaissent que sous certaine conditions d'extinction. L'inconvénient de la nouvelle méthode est de ne plus disposer d'information de vitesse et donc de n'avoir plus que des cartes à deux dimensions. Deux approches ont été adoptées:

1. nous avons cherché à caracteriser la dimension fractale des nuages interstellaires [6] (*c.f.* également [109, 108]), avec la relation de type périmetre–surface qui avait déjà été employée pour les nuages terrestres. Des dimensions de l'ordre de 1.3 ont été trouvées. Cette approche a été depuis critiquée, en particulier par Vogelaar *et al.* [186]. En effet, la présence de bruit peut altérer (en augmentant leur "fractalité")

les contours utilisés pour délimiter les nuages et la notion même de nuage est problématique.

2. Gautier *et al.* (1992) [114] ont mesuré le spectre de puissance $P(k)$ de l'émission infrarouge du milieu diffus. En supposant une symétrie azimutale en k, ce spectre suit une loi de puissance en $k^{-2.9}$. Abergel *et al.* (1996) [77] a étendu cette analyse grâce aux techniques d'ondelettes.

Dans tous les cas, le milieu interstellaire apparait fragementé à toutes les échelles observées (de 0.1 à 100 pc). On a même été jusqu'à quelques 2×10^{-3} pc avec l'aide de mesures en absorption d'étoiles doubles [190]. Il est autosimilaire dans le sens où, mis à part un coefficient multiplicateur pour l'intensité, il est similaire quelle que soit l'èchelle utilisée. On a pu lier la compréhension de la fragmentation des nuages atomiques et surtout moléculaires à la loi d'échelle de la fonction de masse initiale des étoiles. C'est un des grands problèmes astrophysiques contemporains. La connaissance de la distribution spatiale de la matière interstellaire est également indispensable pour les calculs de transfert radiatifs [85]. Enfin, les simulations magnétohydrodynamiques du milieu interstellaire sont loins de rendre compte des mécanismes de structuration de la matière diffuse.

Pour illustrer la complexité du problème, la Fig. 1.3 montre une simulation du ciel infrarouge qui met l'accent sur 1) le fait que les données sont intégrées le long de la ligne de visée et 2) l'aspect filamentaire est perdu dans une description purement k–radiale pour le spectre de puissance.

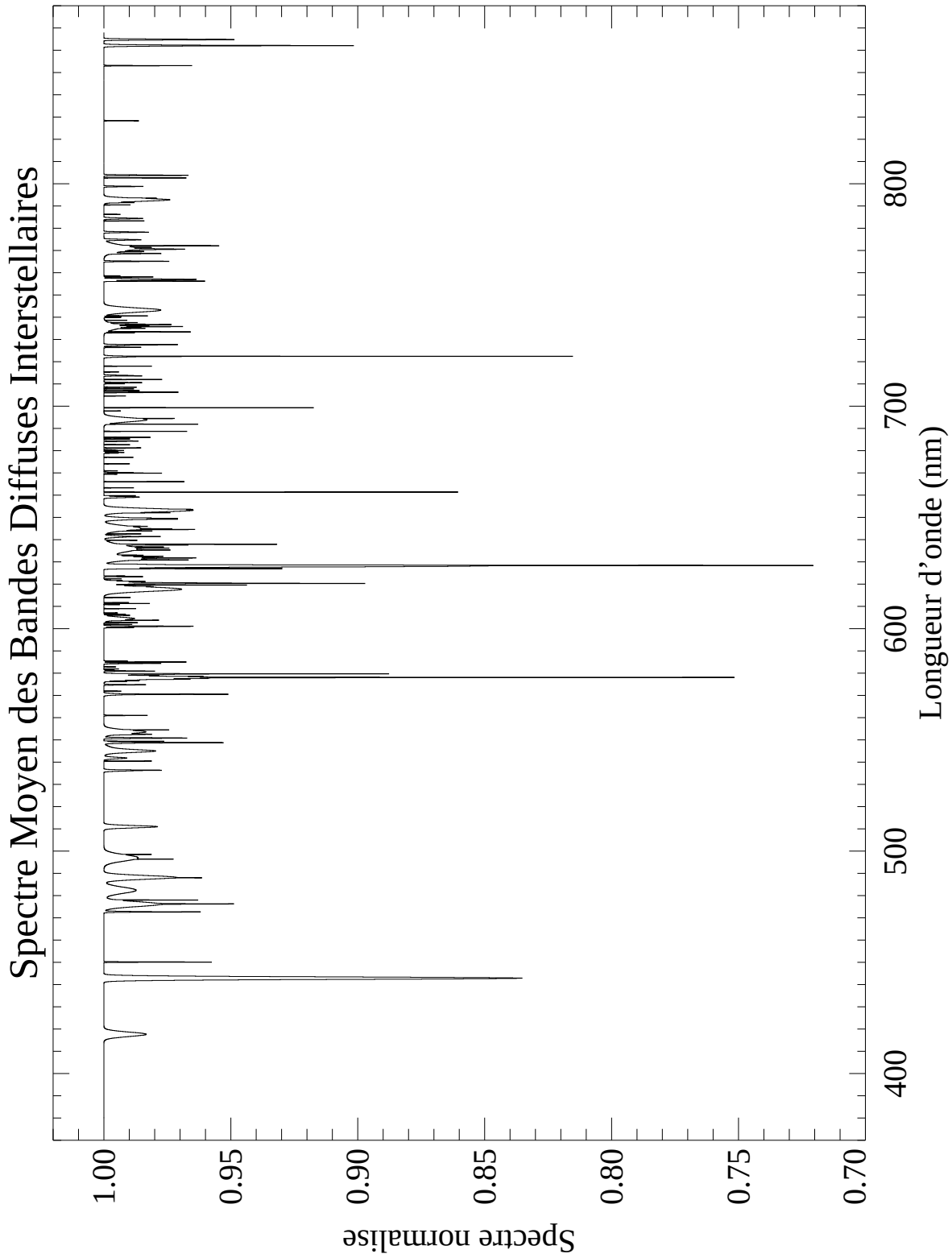

FIG. 1.2 – *Spectre d'absorption moyen synthétique des bandes diffuses interstellaires connues en 1994 [17] normalisé à une extinction de* $A_V = 1$.

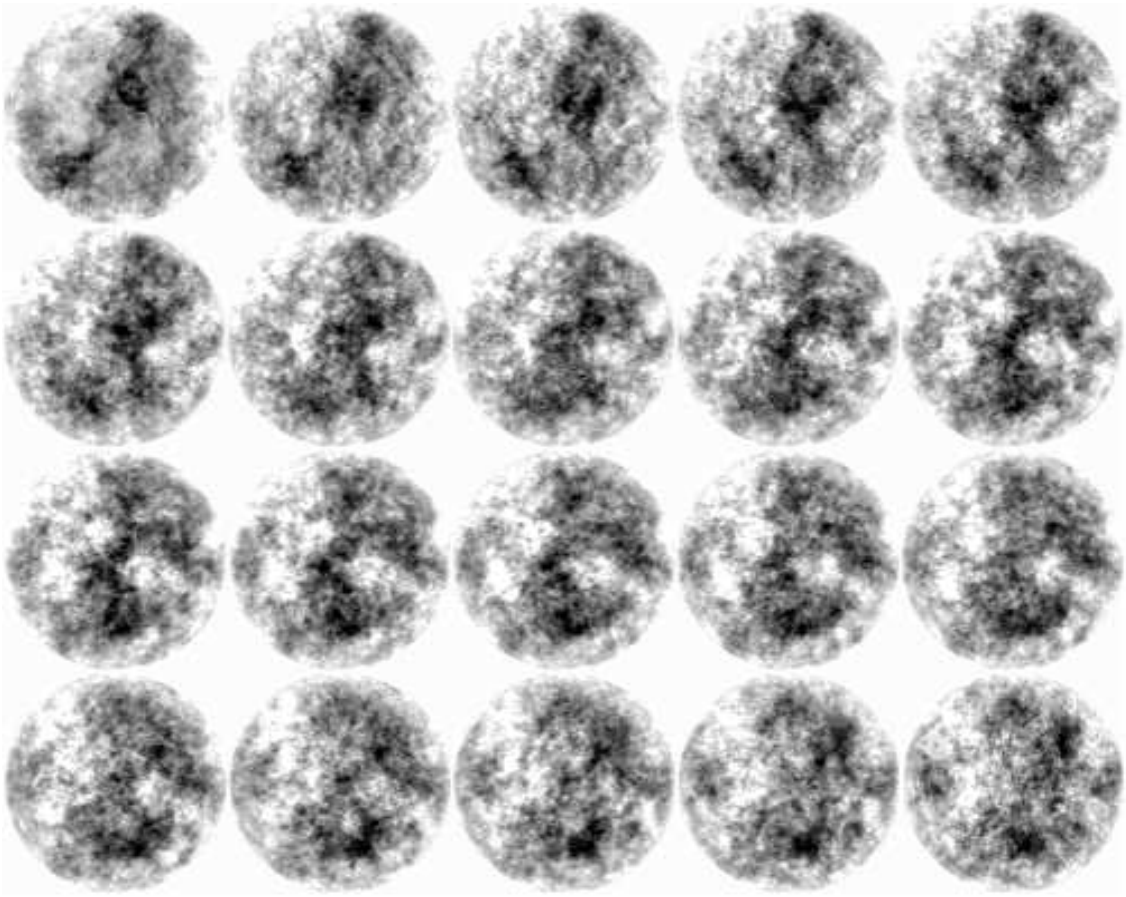

FIG. 1.3 – *Cartes simulées de l'émission infrarouge 100* μm *d'une zone de diamètre 7 degrés. Il s'agit d'une simulation respectant le spectre de puissance moyen du milieu diffus trouvé par Gautier et al. [114]. Chaque carte représente le même bloc spatial mais vu par un observateur qui tournerait autour (chaque vue est décalée de 4.5 degrés par rapport à la précédente). La simulation a été calée sur l'observation* IRAS *au pole nord equatorial: c'est la première carte. Noter que l'aspect filamentaire de cette carte tend à disparaître avec la rotation. L'information de phase est perdue dans une simulation à symétrie k radiale. Figure réalisée avec l'aide de Samy Abbes, stagiaire IAS en 1996*

Chapitre 2

Études des galaxies dans le domaine infrarouge

La motivation globale qui a guidé l'ensemble des travaux de ce chapître a est de comprendre l'énergétique des galaxies. Pour cela, il est clair que le domaine UV et visible, traditionnellement mieux connu, est insuffisant pour un bilan global, en particulier pour les galaxies très lumineuses. Les poussières interstellaires, absorbent une fraction importante du rayonnement provenant des étoiles ou du Noyaux Actif de Galaxie (AGN) mais ne l'emmagasinent pas. Toute cette énergie ressort dans le domaine infrarouge. Pour cela, les études, quoiqu'encore très partielles, des propriétés physiques des grains et de leurs distributions temporelle et spatiale auquelles le chapître 1 était consacré, nous donnent des clés pour la compréhension du ciel extragalactique infrarouge. En Section 2.1, nous montrons comment s'établissent les différentes connections entre la connaissance du milieu interstellaire et les observations de galaxies externes. En section 2.2, nous résumons les travaux sur ISOCAMque nous avons entrepris durant ces huit dernières années[1]. Nous revenons ensuite en Section 2.3 sur le bilan global de la brillance extragalactique du ciel, intégrale sur la ligne de visée de l'émission de toutes les galaxies. Finalement, quelques idées prospectives sont émises en Section 2.4.

2.1 L'observation de la poussière dans les galaxies

A part quelques bandes sombres d'absorption dans le domaine visible sur les bras spiraux ou dans les elliptiques, rien n'était connu de la poussière extragalactique avant l'arrivée des détecteurs infrarouges et des satellites (pour s'affranchir de l'opacité atmosphérique). Le satellite IRAS avec ses détections de plus d'une centaine de milliers de ga-

1. Le satellite IRAS, pourtant lançé en 1985, est toujours sujet de nombreuses publications. Gageons qu'ISO n'en est qu'à ses tout débuts

laxies dans au moins une des bandes à 12, 25, 60 ou 100 μm a permis les premières études quantitatives de l'émission des poussières dans les galaxies externes (cf. *e.g.* [175, 176]). En parallele à cette explosion de données, la spectroscopie sol 3 et 8-13 μm [165, 153, 9] sur des centres suffisamment brillants de galaxies a montré globalement deux classes de galaxies: celles qui sont dominées par les raies PAH, et celles dont le spectre infrarouge moyen (dans la suite MIR) ne montre qu'un continuum avec une absorption des silicates à 9.7 μm.

Nous avons établi en 1988 [4] un lien entre ces propriétés spectroscopiques et les couleurs IRAS. Les galaxies présentant les PAHs ont des couleurs typiques

$$0.01 \lesssim R_{14} \equiv \frac{F_\nu(12\ \mu\mathrm{m})}{F_\nu(100\ \mu\mathrm{m})} \lesssim 0.05\,, \tag{2.1}$$

alors que les galaxies ne montrant qu'un continuum plus ou moins absorbé dans l'infrarouge moyen, montrent un *excés* d'émission MIR (le rapport R_{14} est généralement plus grand que 5 %).

Globalement, les deux populations regroupent les galaxies dont l'énergétique (tout au moins infrarouge) est dominée par la flambée de formation détoiles (Starburst par la suite) et celles dont l'énergétique provient principalement de l'activité centrale (AGN: Seyfert 1 & 2 ou quasar). Certains cas particuliers comme NGC 7469 illustrent le cas d'AGN (connues en optique) qui sont néanmoins Starburst pour l'infrarouge. En outre, il était établi que l'émission PAH étaient étendue (au moins pour M 82, galaxie Starburst la plus proche [132]) alors que l'émission MIR de type AGN est ponctuelle (à l'interieur des 100 pc centraux, *e.g.* NGC 1068 [91]). On comprend assez bien les couleurs des galaxies Starburst et normales à partir des modèles de poussières [125, 126] et des propriétés globales des régions de formation d'étoiles dans notre galaxie [5] (cf. la discussion en Section 2.2.2). En revanche, l'émission MIR d'un AGN représente encore actuellement une énigme [60, 91]. Il est probable qu'elle provienne d'un tore de poussières (très petits grains ou gros grains?) au voisinage du trou noir central. Par quel mécanisme les PAHs ont-ils été détruits [52]? Est-ce la thermophotodissociation proposées par Léger *et al.* (1989) [8]: les photons UV durs dans l'environnement du trou noir feraient exploser les PAHs par processus d'absorption mono ou biphoton? Ou bien, les rayons X [188, 187]? Cette dernière hypothèse aurait le mérite additionnel de fournir un mécanisme de chauffage des grains (quelque soit leur nature par ailleurs) par rayons X, alternatif au chauffage UV-visible qui présente des difficultés en terme de transfert de rayonnement dans une région aussi compacte. Nous reviendrons sur les rapports entre émission X et MIR à propos d'ISOCAM.

La relation 2.1 ou plutôt son opposée peuvent aider à la constitution d'un échantillon de galaxies AGN sélectionnées à partir de l'infrarouge et donc non biaisées par l'extinction et les critères optiques. M. Dennefeld et moi-même conduisons à l'heure actuelle une telle

recherche à l'OHP. De Grijp *et al.* (1985) [97] ont déjà montré l'efficacité d'une telle approche à partir de la couleur IRAS R_{23}.

La principale limitation d'IRAS pour ce qui concerne le ciel extragalactique est la faible profondeur du relevé. Le décalage vers le rouge (ci-après redshift [2]) median pour les sources les plus faibles à 60 μm n'est que de l'ordre de 0.1. Des études sur les comptages de sources IRAS semblent bien indiquer une forte évolution des galaxies [146], mais le domaine de redshift est très faible. En outre la résolution angulaire d'IRAS (la minute d'arc) est insuffisante pour écarter le fait que la multiplicité des sources puisse fausser ces comptages: plusieurs relevés ISOCAM sont en effet consacrés au suivi de nombreuses sources IRAS, dont le "filler survey" de Lonsdale *et al.* (1998) [144] et l'étude de Dennefeld *et al.* (1999) [99]. Nous montrons dans la suite comment le gain en sensibilité et en résolution angulaire qu'apporte ISOCAM nous permettent d'atteindre l'évolution majeure de l'énergétique des galaxies ($z \sim 1$). Néanmoins, l'apport d'IRAS fut majeur pour l'astronomie IR: soulignons que au moins localement, les galaxies IR ultralumineuses ($L > 10^{12}\,L_\odot$) sont plus abondantes que les quasars. L'amplification gravitationnelle a permis pour certaines galaxies de les rendre détectable à haut redshift, *e.g.* F10214+4724 (z=2.28).

2.2 ISOCAM

La caméra infrarouge moyen d'ISO a été construite par un consortium européen dirigé par le CEA-Saclay (Césarsky *et al.* 1986 [29]). ISOCAM a occupé une grande fraction de mon activité scientifique et de service depuis 1990: d'une part, j'ai participé à l'étalonnage sol de la caméra (sous-section 2.2.1), et d'autre part à l'analyse des données provenant de multiples relevés extragalactiques (sous-section 2.2.3 préparée par la sous-section de revue 2.2.2).

2.2.1 Étalonnage d'ISOCAM

[3]Depuis Août 1991, la caméra proche-infrarouge (2.5–18 μm) de l'Observatoire Infrarouge Spatial, plus connu sous le nom de satellite ISO, est testée à quelques degrés Kelvin à l'Institut d'Astrophysique Spatiale (Orsay). La caméra est constituée de deux canaux dénommés SW (short wavelength) et LW (long wavelength) qui mesurent respectivement les domaines de longueurs d'onde de 2.5 à 5.5 μm et 4 à 18 μm. Au bout de chacun de ces canaux se trouve un détecteur comprenant 32 par 32 pixels sujets à la lumière. Une série de filtres permet d'ajuster la bande de longueurs d'onde désirée et une série de lentilles

2. Ne devrait-on pas appeler ce décalage infraredshift dans ce mémoire?

3. Texte emprunté en partie au "Jeu de l'OIS", BIOP 1993

assure un grandissement variable correspondant à 1.5 jusqu'à 12 secondes d'arc carré par pixel sur le ciel.

Pour étalonner la caméra, l'IAS a mis à contribution sa nouvelle station d'étalonnage sur le campus d'Orsay qui abrite ainsi un immense cryostat (plus d'un mètre de diamètre) dont l'intérieur est refroidi 'a la température de l'Helium liquide (2.5 K) ceci en continu pendant plusieurs mois consécutifs. Ce "frigo" comprend, outre la caméra elle-même: les différents modèles (qualification, vol, remplacement) y sont passés, un système de sources de lumière (des corps noirs à température ajustable de 150 à 450 K), et une optique produisant, dans le plan focal de la caméra, la combinaison variable d'une source ponctuelle, d'une source étendue et d'une source monochromatique, simulant le faisceau du télescope ISO. Il s'agit en effet de simuler, au sol, un environnement spatial et un ciel nocturne que la caméra rencontrera durant les 18 mois prévus en vol. Les problèmes de ce cryostat (résolus avant les grandes campagnes de mesures) furent pendant longtemps le niveau de lumière infrarouge qui arrivait à se faufiler à l'intérieur et inondait les détecteurs, ainsi qu'une fuite d'hélium-gaz qui nuisait à la stabilité thermique des composants optiques. Cet étalonnage, conduit par Michel Pérault (Groupe de Radioastronomie de l'ENS) et Alain Soufflot (IAS), est désormais achevé. Cette opération éprouvante mais néanmoin fructueuse a été rendue possible grâce à un ensemble logiciel qui permettait des mesures automatiques et préréduites, à la rédaction duquel j'ai participé.

Pour préparer la communauté (large) d'utilisateurs potentiels d'ISOCAM, nous avons établi de nombreux résultats d'étalonnage sol [61]. En particulier, 1) les détecteurs infrarouges sont sujets à des phénomènes transitoires lors de variations du flux incident, qui empêchent paradoxalement une mesure photométrique rapide sur des objets brillants et réduisent la précision sur des sources faibles; 2) des effets de mémoire (liés aux transitoires précédents) perturbent la réponse de la caméra; 3) les sources qui peuvent être détectées représentent parfois des fractions infimes (10^{-5}) du fonds diffus, d'où un probleme de champ plat; 4) une autre source d'incertitude est l'importance du bruit causé par les rayons cosmiques (qui seront, en outre, différents en vol de leur apparence au sol). D'autres problèmes repérés par l'étalonnage: des polariseurs défectueux (vieillissement prématuré du substrat) sont remplacés, les détecteurs SW montrent un bruit corrélé, & les filtres doivent être inclinés pour éviter la lumière parasite "narcissique".

Mentionnons enfin qu'une campagne d'une dizaine de mois a mobilisé plusieurs dizaines de personnes à plein temps, 50 000 litres d'Helium liquide (20FF/litre), 60 Gigaoctets (sur 100 disques magnéto-optiques).

2.2.2 L'apport d'ISOCAM pour la physique des galaxies

Les premiers résultats de spectroscopie d'ISO [130], que ce soit SWS ou le CVF d'ISOCAM, confirment l'omniprésence des raies PAHs dans les galaxies spirales ou Starburst. La distinction entre raie du Néon et raie PAH à 12.8 μm , toutes deux généralement présentes, se fait surtout avec la haute résolution spectrale de SWS [184, 154]. L'analyse spectroscopique de M 51 [30] et de son compagnon (Boulade *et al.* 1996 [87]) ainsi que les deux galaxies en collision des Antennes (Vigroux *et al.* [185]) conduisent clairement (en particulier Tran [180]) à l'existence de deux composantes distinctes pour le spectre MIR des galaxies, en convergence avec les decompositions photométriques plus anciennes d' IRAS [126, 167, 168]; ceci en négligeant les effets d'extinction et d'émission AGN. Peut-on identifier dans notre galaxie les contours de ces deux composantes? Pour cela, aidons–nous des conclusions IRAS préliminaires de Ghosh, *et al.* (1986) [115] et utilisons d'une part la photométrie IRAS de la Nébuleuse de la Californie [5] ainsi que la répartition des photons ionisants absorbés par les régions HII elles-mêmes (environ 30 %) et ceux qui s'échappent (Leisawitz & Hauser, 1988 [143]). Nous identifions une des 2 composantes comme étant l'émission directement associée à l'ensemble des régions HII et l'autre au milieu diffus interstellaire (qu'on appellera CIRR – les fameux cirrus IRAS pris au sens large – pour simplifier) chauffé par les photons HII échappés mais aussi par les étoiles plus vieilles. A partir des données DIRBE sur Orion, Wall *et al.* (1996) [189] ont montré une grande similarité photométrique avec les galaxies. La composante HII a paradoxalement un spectre MIR plus froid (en température de couleur) que la composante CIRR. Elle est en première approximation dépourvue de PAH, relativement à la composante VSG qui, quant à elle, y a un rôle majeur. Nous pensons que les spectres MIR des galaxies ne voient pas l'émission des BG, de même que Tran (1998) [180] montre que dans M 17, le spectre MIR ne change pas avec la distance à l'étoile excitatrice (alors que les couleurs dans l'infrarouge lointain lui varient énormément). L'émission CIRR ne provient sans doute pas du milieu dense moléculaire (qui est suffisamment écranté) mais plutôt du milieu HI diffus. Elle est assez loin des étoiles O ou B pour que les PAHs survivent. Globalement, pour la composante CIRR des galaxies, l'abondance des PAH relative aux BG est remarquablement constante, comme en atteste la relation 2.1 (p. 22). Des modèles de spectres de galaxies IR fondés sur ces décompositions ont été utilisés par Rowan–Robinson [166, 167, 168] et plus récemment par Guiderdoni *et al.* (1998) [120].

2.2.3 Les relevés profonds de galaxies avec ISOCAM

Le satellite ISO a été lancé le 17 novembre 1995 à Kourou par une fusée Ariane 4. Le 8 avril 1998, la dernière goutte[4] d'Helium s'évaporait. ISO a donc rendu 29 mois de bons et loyaux services (18 mois seulement étaient escomptés). Les opérations en vol se sont déroulées avec une très bonne efficacité scientifique. Soulignons que le pointage d'ISO fut bien meilleur qu'attendu (de l'ordre de la seconde d'arc), ce qui a grandement facilité l'exploitation des données. L'étalonnage absolu au sol d'ISOCAM a été retrouvé en vol à 10% près (un record!) par comparaison à des étoiles de référence et au fond zodiacal mesuré par DIRBE. L'étalonnage en vol a permis de corriger quelques erreurs (en particulier sur la transmission de certains filtres SW). Il a surtout révélé l'ampleur des deux problèmes d'ISOCAM: 1) les rayons cosmiques qui amputent la caméra de quelques 5 % de ses pixels en moyenne et dont certains ont des effets à long terme, 2) le comportement transitoire lent sur les marches de flux (ainsi que le bruit en 1/f des détecteurs), qui donne une incertitude photométrique importante.

Dans une publication [41], nous détaillons l'approche numérique employée à l'IAS pour traiter des deux problèmes précédents. Pour cela, nous avons utilisé les données publiques d'ISOCAM sur le champ profond de Hubble cartographié dans le visible par le HST. La redondance est un élément clé pour tester la fiabilité des méthodes de recherche de sources faibles ISOCAM développées de par le monde. La reproductibilité interne a pu être démontrée (comparer les Figures 6, 7 et 8 dans [41]). La reproductibilité externe a été validée grâce à l'approche alternative indépendante développée au SAp à Saclay (Aussel *et al.* 1999 [80]). En outre, les contreparties visibles et infrarouges proches existent pour la plupart des sources ISOCAM, ce qui fournit un troisième type de reproductibilité. Soulignons que les galaxies les plus faibles détectées dans le HDF (à 7 et 15 μm) ont un flux trois mille fois plus petit que les plus faibles galaxie IRAS à 12 μm .

Plusieurs centaines d'heures ISO ont été utilisées à des fins cosmologiques pour étudier la population des galaxies IR et son évolution. Il était critique de démontrer que malgré les avalanches de rayons cosmiques et les effets néfastes du comportement des détecteurs d'ISOCAM, un traitement approprié pouvait néanmoins permettre de récupérer les sources IR. J'ai participé à de nombreux programmes ISOCAM afin de mettre en œuvre notre approche: les programmes dits en temps garanti (tous les programmes "deep survey" d'ISOCAM: IDSP dans la suite) et les diverses propositions d'observations acceptées sur temps ouvert.

Notre approche implémentée sur les données du champ[5] CFRS 1415+52 par Flores

4. `http://www.iso.vilspa.esa.es/isoinfo/isoinfo-13`

5. CFRS: Canada-France Redshift Survey, programme coordonné d'observations photométriques et spectroscopiques profondes effectué au télescope CFHT [145]

et al. (1999a [42], 1999b [43]) a permis de dégager les premières caractéristiques des galaxies ISOCAM qui émettent entre 100 μJy et 1 mJy, car ce champ de 10 par 10 minutes d'arc est déjà bien connu dans le domaine visible à la fois photométriquement et spectroscopiquement et a fait l'objet d'un relevé radio VLA très profond. Les galaxies se rangent à nouveau pour la plupart en deux catégories, les AGN & quasars et les starburst & post-starburt, de luminosité typique de 3×10^{11} $L_\odot$. L'effet des bandes d'émission PAH, en particulier le massif à 7.7 μm, est sans doute en action pour expliquer le redshift median de 0.7 trouvé pour les galaxies qui émettent à 15 μm. La conséquence de cette étude est que le taux de formation d'étoiles dans l'Univers à ces redshifts (0.5 à 1) doit être révisé vers le haut par un facteur 2 à 3. Les galaxies qui participent à cette augmentation ne constituent qu'un toute petite fraction de l'ensemble des galaxies à ces redshifts: c'est principalement les galaxies de forte luminosité qui évoluent le plus vite.

Les premières conclusions des comptages profonds à 15 μm de longueur d'onde (filtre LW3) des programmes IDSP sont données par Elbaz *et al.* (1998) [73] et détaillées ici dans [71]. Elles peuvent être résumées, une fois les étoiles soustraites, par

$$N(> S_\nu) = 200 \left(\frac{S_\nu}{1\,\mathrm{mJy}} \right)^{1.5} \mathrm{galaxies.deg}^{-2}\,, \tag{2.2}$$

pour des galaxies dont le flux S_ν va de 100 à 3000 μJy, avec une incertitude absolue de moins de 40%. Un léger excés par rapport à ce comptage pseudo-euclidien existe même peut-être, autour de 200 μJy. Dans tous les cas, les modèles sans évolution ne permettent pas de rendre compte du non-affaiblissement des comptages en dessous du mJy. Calé sur IRAS, ils prédisent même de 2 à 3 fois moins de galaxies qu'observées. La raison en est que les comptages en première approximation représentent la fonction de luminosité pondérée par la luminosité à la puissance 3/2 (effet de volume contrecarrant l'effet de diminution de flux). Les fonctions de luminosité locale IR (*e.g.* [176]) ont toutes un applatissement aux faibles luminosités. Les faibles flux ISOCAM permettent d'atteindre les galaxies locales de faible luminosité qui sont donc en relativement petit nombre. Sans évolution, les comptages devraient être sub-euclidiens en dessous de 10 mJy. L'existence d'une population très lumineuse abondante à haut redshift est un résultat majeur de cette étude. Une conséquence en est l'estimation du fond diffus minimum produit par toutes ces galaxies à 15 μm : $2.4 \pm 0.8\,\mathrm{nW\,m^{-2}\,sr^{-1}}$ (pour $S_\nu > 50\,\mu$Jy). C'est l'objet de la section suivante.

2.3 Le fond diffus infrarouge et submillimétrique

Le fond diffus extragalactique (EBL) du ciel nous révèle l'énergétique globale de l'univers. Désormais, nous savons que c'est la partie millimétrique du spectre qui est la plus

brillante, la plus lointaine et paradoxalement la plus froide des composantes: c'est le rayonnement fossile à 3 K sur lequel nous reviendrons dans le chapître suivant. La formation des galaxies et des éléments lourds associés, a dû laisser une trace nette à plus haute frèquence. Nous résumons ici cette recherche du fond EBL à laquelle nous avons contribuée.

Le fond diffus du ciel extra-galactique peut être défini par ce qui reste de la brillance du ciel quand on a retiré les contributions locales, qu'elles soient d'origine atmosphérique, de l'environnement solaire ou galactique. C'est la technique soustractive, qui nous donne le fond total extragalactique. La difficulté majeure de cette technique est que, quelle que soit la longueur d'onde observée, l'intensité des fonds locaux dominent par plusieurs ordres de grandeur.

La technique additive, quant à elle, intègre, le long de la ligne de visée, les contributions des différentes sources extragalactiques (galaxies, amas, ...). Elle suppose que le fonds est la somme des sources discrètes (elle est donc inapplicable au rayonnement fossile à 3 K qui est le seul rayonnement proprement diffus avec eventuellement une petite fraction du fond X). L'intensité du fond de ciel extragalactique peut s'écrire de deux manières différentes, celle de l'expérimentateur et celle du théoricien–modélisateur:

$$\nu I_\nu = \frac{c\nu}{4\pi}\int_0^{t_0} dt \frac{l_{\omega\nu}}{\omega^3}\,. \tag{2.3}$$

$$= \nu \lim_{S_\nu \to 0} [\int_{S_\nu}^{+\infty} dS' S' \frac{dN}{dS'}]\,. \tag{2.4}$$

Les observateurs essaient de diminuer la limite S_ν dans l'Eq. 2.4: tant que les comptages ont une pente euclidienne ($\alpha = 5/2$ avec $dN/dS_\nu \propto S_\nu^{-\alpha}$) ou sur-critique ($\alpha > 2$), le fond ne cesse de croître (paradoxe d'Olbers). Les modélisateurs partent de la densité de luminosité locale de l'univers l_ν, se donnent un profil d'évolution $l = E_t \omega^3 l_0$ où $\omega = 1/R_t = 1 + z$ et des paramètres d'univers $\omega(t)$ pour déduire le fond attendu par l'Eq. 2.3 (équation qui n'exprime que la conservation du nombre de photons (une fois produits) par unité de volume comobile).

Nous avons appliqué la première méthode avec les données disponibles provenant de l'instrument FIRAS, l'une des trois expérience de COBE. Alors que l'équipe FIRAS cherchait une détermination intrinsèque de la lumière extragalactique submillimétrique (CFIRB), c'est-à-dire sans l'aide de données externes, nous avons plutôt utilisé (Puget *et al.* 1996 [25]) ce que l'on savait des cirrus interstellaires – la principale gêne à la mesure du CFIRB (comparer Fig. 1.1 and Fig. 2.1) – et en particulier, les données HI, pour pouvoir inférer l'existence probable d'un fond beaucoup plus important qu'attendu. Etant extérieurs à l'équipe FIRAS, et ne connaissant pas complètement les détails de l'instrument et du traitement de données (notre mesure est directement liée au point zéro d'un

instrument qui est certes interférométrique), nous avons subi quelques critiques acerbes avant une confirmation bienvenue de Fixsen *et al.* (1998) [110] obtenue avec les mêmes données FIRAS et Hauser *et al.* (1998) [124] grâce à DIRBE. Les développements récents qui affinent l'évaluation du fond CFIRB concernent surtout la partie 100-300 μm : l'émission IR du gaz ionisé diffus de notre galaxie doit être proprement évaluée et soustraite, ce qui est fait pour la première fois par Lagache *et al.* (1999) [45]. La figure 2.1 résume les évaluations les plus récentes du fond EBL et 3 K de 0.2 à 2000 μm . Les bornes marquées par des flèches incluent par longueur d'onde croissante les mesures de:

- Toller (1981) [179] a trouvé une valeur supérieure de 24 $\mathrm{nW\,m^{-2}\,sr^{-1}}$ (3 σ) dans la bande V grâce au photopolarimetre imageur embarqué sur Pionneer 10 au dela de 3 U.A.

- Pozzetti *et al.* (1998) [160] qui résument les comptages HST du HDF et en K. Ces comptages donne un fond EBL qui semble avoir convergé.

- ISOCAM [71, 73, 80]: *c.f.* la sous-section 2.2.3.

- l'obervatoire Whipple des photons TeV par Biller *et al.* (1995, 1999) [83, 82] (ainsi que le télescope CAT). Le fond MIR est partiellement opaque aux photons de très haute énergie (par création de paires d'électrons-positrons). L'observations de 3 AGN à ces énergies permet de contraindre l'intensité EBL (flèches vers le bas dans la Fig 2.1).

- IRAS par Lonsdale *et al.* (1990) [146] et Bertin *et al.* (1998) [81]: les comptages vont jusqu'à des flux de 110 mJy .

- ISOPHOT par Puget *et al.* (1998) [46] et Dole *et al.* (1999) [74]: le projet de comptage des sources dans le submillimétrique, à la longueur d'onde la plus élevé d'ISO, appelé FIRBACK révèle une population de sources à des flux supérieurs à 100 mJy , différente de la population IRAS. Les comptages par Dole *et al.* (1999) [74] exploitant toute la surface observée par FIRBACK donnent un facteur 2 en dessous de la première estimation. 5 à 10% du fond est d'ores et déjà résolu en sources ponctuelles. Le faible taux de contreparties à 15 μm reste à élucider.

- SCUBA sur le télescope de 15 m JCMT à Hawaï détecte une population dóbjets à des flux supérieurs à 3 mJy à 850 μm dans plusieurs champs, dont le HDF (Hughes *et al.* 1998 [129]). Nous retenons l'évaluation d'Eales *et al.* (1998) [102] à 450 et 850 μm . Environ un tiers du fond EBL est résolu.

La figure 2.2 montre comment se répartit l'énergétique globale de l'univers à des redshifts $z < 5$ entre la production directe d'énergie stellaire et sa transformation par les

poussières dans l'IR. Le contraste est d'un facteur 2 pour le rapport IR/visible alors que pour l'univers local il n'est que d'un facteur 1/3 [176]. La production d'énergie dans l'univers à $1 < z < 5$ s'est donc faite dans des galaxies fortement obscurcies par rapport à celles que l'on connait localement. Le rapport entre la production d'énergie de l'Univers en galaxies et le Big Bang (normalisé par le redshift de production, donc par $1 + z_{prod}$) est de 1.1×10^{-4}. On admet généralement qu'une énergie de 7 MeV est rayonnée pour chaque nucléon processé dans les étoiles. Le fond EBL implique donc une densité réduite (*i.e.* normalisée à la densité critique) de nucléons processés de:

$$\Omega_p = 1.3 \times 10^{-3} \, (\frac{I}{50\,\mathrm{nW\,m^{-2}\,sr^{-1}}})(\frac{1+z_{prod}}{2})(\frac{h}{0.5})^{-2} \,. \tag{2.5}$$

En prenant en compte une efficacité $f_\star$ d'environ 10% (obtenue pour une fonction de masse initiale à la Salpeter, les petites étoiles sont loin d'avoir tout brulé) on déduit que $13\%(\Omega_B/0.10)^{-1}$ (cf. Table 3.1) des baryons ont déjà participé à la formation d'étoiles dans les galaxies. L'Univers a donc épuisé une fraction non négligeable de son combustible!

Une question moderne suscitée par les découvertes récentes du fond EBL (visible et IR au sens large) et d'une fraction notable des sources qui y contribuent, est de déduire le taux de formation d'étoiles en fonction du temps après le Big Bang. Un pic se dessine à des redshifts de 1 ou 2, qui dénote une période (les quelques 5 premiers milliards d'années) où l'Univers formait des étoiles dix à trente fois plus vite que maintenant. Les avancées dans le domaine submillimétrique montrent que les premières galaxies sont probablement nées violemment et très éteintes, à des redshifts supérieurs. Un argument fort se dessine qui concerne la haute métallicité déduite de la raie X du fer du milieu intra-amas [104, 155] qui s'écrit:

$$\Omega_Z(\,\mathrm{amas}) = 2.2 \times 10^{-4} \,. \tag{2.6}$$

Celle-ci est un facteur trois plus grande que la métallicité cumulant les galaxies observées [147]. En admettant un épisode obscurci de formation des sphéroïdes (et elliptiques) à un redshift moyen de 3, et une efficacité de production de métaux (carbone! et autres) de 0.27 en masse par nucléon [147], on obtient cette valeur (avec l'Eq. 2.5) en consacrant une grande fraction (50%) du fond EBL submillimétrique:

$$\Omega_Z(\,\mathrm{sph}) = 2.0 \times 10^{-4} \, (\frac{I}{16\,\mathrm{nW\,m^{-2}\,sr^{-1}}})(\frac{1+z_{prod}}{4})(\frac{h}{0.5})^{-2} \,. \tag{2.7}$$

L'idée d'une formation bimodale des galaxies (Elbaz *et al.* 1995 [104] et [155, 92]): les elliptiques se forment rapidement pendant un temps de 1 à 3 Gan, alors que les galaxies de type tardif avec un taux de formation-activité continument décroissant, est loin de faire l'unanimité (*c.f.* Madau *et al.* 1998 [148], Harwit 1999 [123] et la discussion d'Ellis 1998 [105]). Elle n'est pas sans arguments théoriques, mais sort du cadre de formation

purement hiérarchique des galaxies [120]. Seules les études statistiques et individuelles à venir (*c.f.* Section 2.4) des objets peuplant le fond EBL pourront lever un coin du voile.

Allons encore plus loin en redshift: un fond UV devrait exister (hors celui produit par les quasars) provenant des photons échappés de toute formation d'étoiles dans les galaxies. Supposons qu'un fond EBL submillimétrique de 1 $\mathrm{nW\,m^{-2}\,sr^{-1}}$ (5% du fond observé) soit produit à un redshift moyen de $z_i = 5$ et qu'un pourcent des photons UV arrivent à s'échapper du chaudron de formation d'étoiles (7 MeV produisent avec $\epsilon_{UV} = 1\%$ d'efficacité 5400 photons UV par nucléon). On trouve alors avec l'aide de l'Eq. 2.5, qu'on peut ioniser

$$\Omega_i = 0.42\ (\frac{I}{1\,\mathrm{nW\,m^{-2}\,sr^{-1}}})(\frac{1+z_i}{6})(\frac{h}{0.5})^{-2}(\frac{\epsilon_{UV}}{0.01}), \tag{2.8}$$

c'est-à-dire tous les baryons.

Enfin, mentionnons l'immense problématique de l'évolution quasiment symbiotique des AGN et du phénomène Starburst, et en particulier du lien entre fond diffus X et IR (*e.g.* Fabian *et al.* 1998 [106], Fabian & Iwasawa 1999 [107]).

2.4 Prospective

On peut sans crainte s'attendre à la connaissance d'un nombre exponentiellement croissant de galaxies grâce aux nouvelles avancées technologiques:

- dans le visible et le proche IR au sol, c'est le format des CCD, la spectroscopie integrale de champ (dite 3D) et surtout la taille des miroirs (Keck et autre Vlt) qui nous permettront, en particulier, le suivi des sources Iso et Scuba.

- dans le MIR, Sirtf et Isis devraient nous permettre d'approfondir les résultats Iso, sans parler du projet Ngst.

- l'arrivée de matrices bolométriques de grand format va révolutionner l'astronomie de recherche de sources (sub)millimétriques: sur l'avion Sofia & le satelliteFirst et au sol, sur le télescope de 30 m de l'IRAM [72] et au pôle Sud (ou autre Désert d'Atacama). Planck devrait aussi livrer un catalogue de sources (sub)millimétriques sur tout le ciel.

- le Alma (interférométrie submillimétrique de l'hémisphère Sud) sera le cheval de bataille des suivis détaillés des sources.

Le parent pauvre est peut-être le domaine MIR (25 à 60 μm) puisque la mission Wire a échoué juste après le lancement au début de 1999. En outre, le projet de petite sonde [64]

qui irait observer au delà du nuage zodiacal, que nous avions soumis à l'ESA, n'est pas à l'ordre du jour. Mais n'oublions pas SIRTF.

En conlusion, si le NGST va nous ouvrir les portes de l'analyse détaillée des galaxies au moment du pic de formation d'étoiles de l'Univers, le projet ALMA devrait, quant à lui, nous fournir une connaissance approfondie des premières galaxies et de leur cocon de poussières.

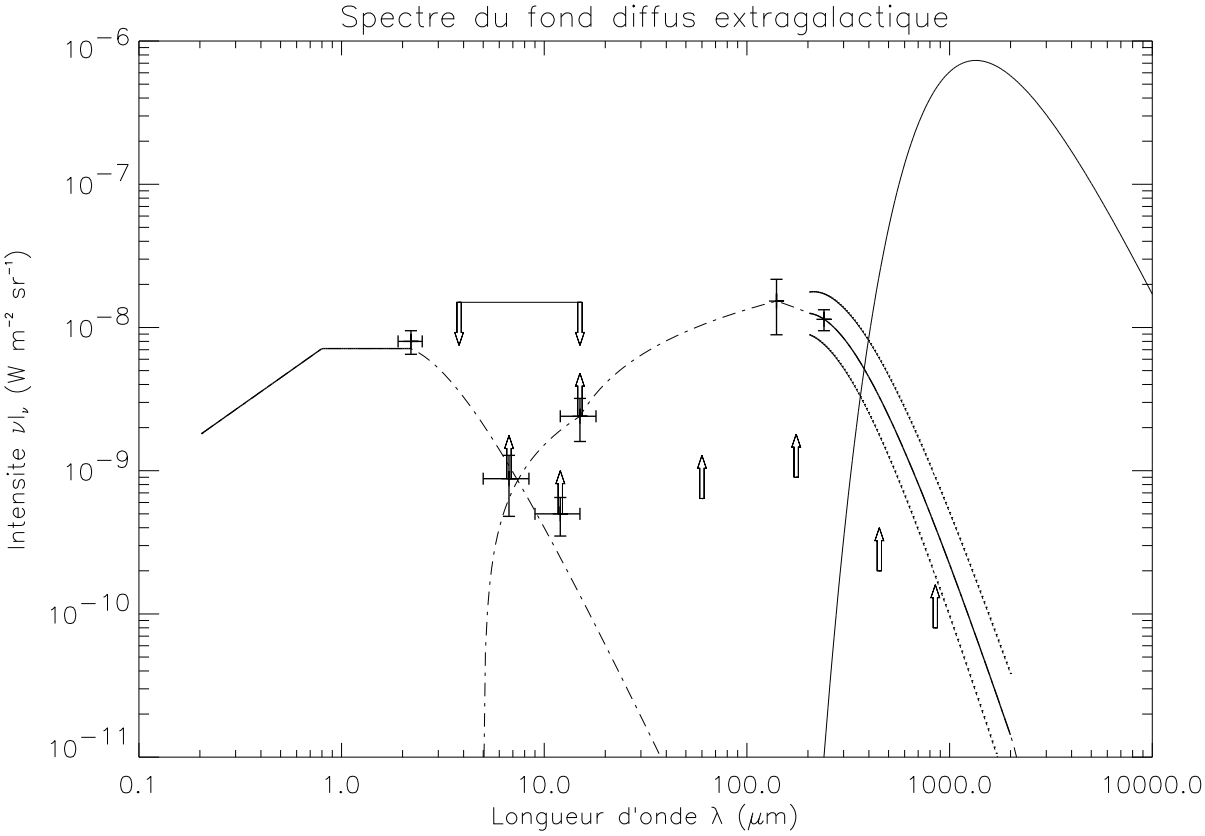

FIG. 2.1 – *Spectre visible, infrarouge et millimétrique du fond diffus extragalactique tel qu'observé en 1999 (courbes et croix en gras). Seules des valeurs supérieures existaient en 1995, excepté pour le 3 K. De droite à gauche, on trouve le 3 K obtenu avec* FIRAS *[150, 149], le CFIRB dans le domaine submillimétrique [45], obtenu avec* FIRAS *(l'enveloppe en pointillés représente l'incertitude absolue sur ce fond) et* DIRBE*, et dans le visible jusqu'à l'IR proche le fond intégré mesuré par le HST et les comptages sol en K [160] qui convergent. Les valeurs inférieures du fond EBL provenant des comptages* ISOCAM *(7, 12, & 15 μm), IRAS (60 μm), ISOPHOT (175 μm) et SCUBA (450 & 850 μm) sont dénotées par les flêches. Les lignes en tiret-pointillé sont d'une part, une interpolation linéaire pour le fond IR et d'autre part, une extrapolation avec un corps noir à 2000 K pour le fond proche IR (c.f. Fig. 2.2). Cette figure est inspirée de la figure 5.3 de Lagache (1998) [137]. La mise à jour ne retient que les évaluations du fond à partir de comptages de sources les plus récents et les plus représentatifs (c.f. texte). Pour comparer au fond diffus galactique et zodiacal, se référer à [142]*

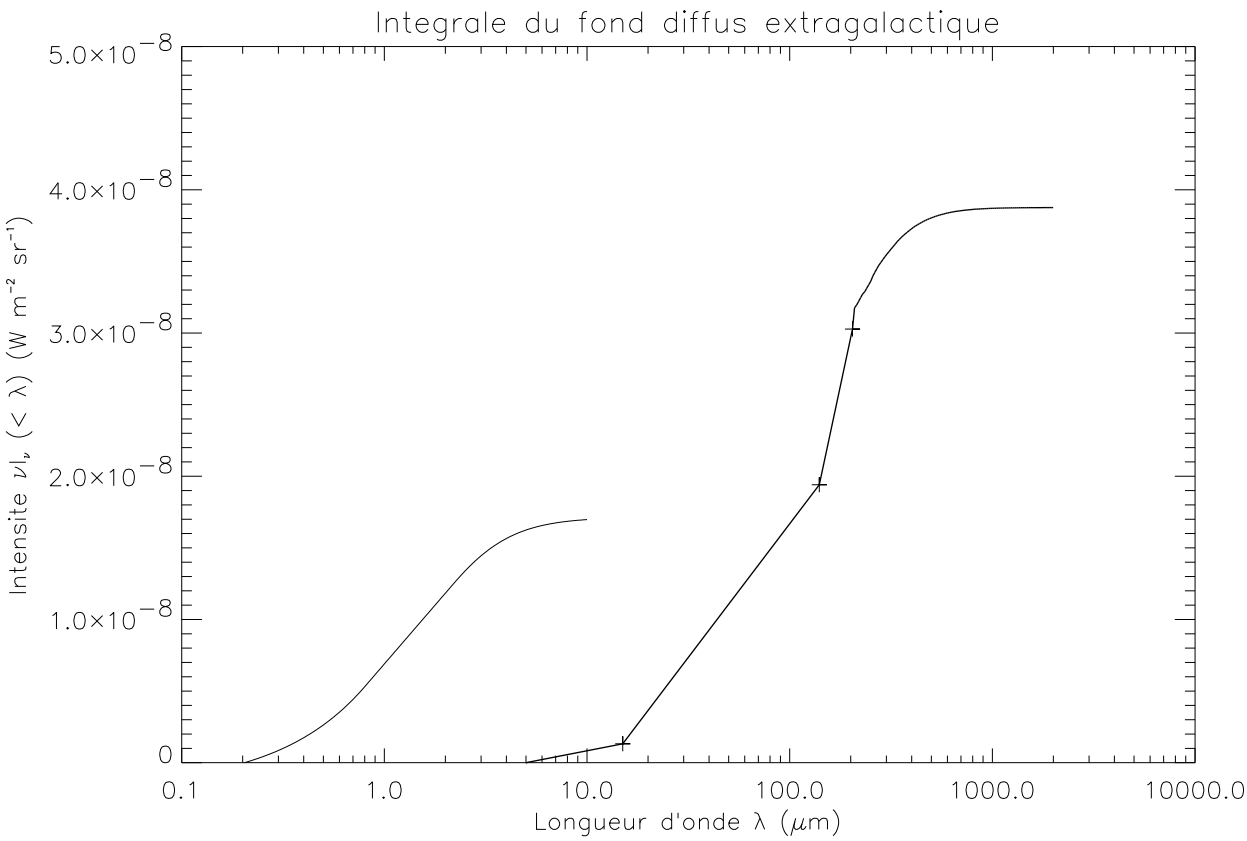

FIG. 2.2 – *Intégrale du fond diffus extragalactique* ($\int_\nu^\infty d\nu I_\nu$). *La courbe en trait* **gras** *montre le fond provenant de l'émission infrarouge des galaxies. La courbe en trait fin est l'intégrale de l'émission directement stellaire des galaxies. Ce sont les mesures de la Fig. 2.1 prolongées par les lignes en tiret-pointillé qui ont été intégrée en fonction de* λ *croissant. Autant d'énergie est émise dans le domaine submillimétrique* ($\lambda > 100\ \mu\mathrm{m}$) *que dans l'infrarouge moyen et lointain. Noter que le 3 K produit quant à lui, une intégrale de* $1.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{W\,m^{-2}\,sr^{-1}}$.

Chapitre 3

Mesures du rayonnement cosmologique à 3 K

3.1 Le modèle le plus simple d'Univers

LES trois piliers du Big Bang sont l'expansion de l'Univers, la nucléosynthèse primordiale et le rayonnement cosmologique à 3 K (CMB[1]). Le premier nous fixe l'échelle de distance grâce à la constante de Hubble $H_0 = 100\ h\,\mathrm{kms^{-1}Mpc^{-1}}$ et de temps $1/H_0 = 9.8\ h^{-1}$ Gan (1 Gan= 1 milliard d'années), où les observations donnent l'estimation floue $0.4 \lesssim h \lesssim 0.9$. Le deuxième nous précise que les éléments légers tels que le deutérium, une partie de l'hélium, le lithium ont été synthétisés dans les trois premières minutes d'une phase très chaude de l'Univers où les baryons étaient en léger surnombre face aux antibaryons (un pour un milliard). Le dernier pilier, le CMB, qui nous occupera par la suite, est certainement le plus riche en informations tant sur l'Univers primordial que sur le milieu qu'il traverse avant d'atteindre nos détecteurs.

Le satellite COBE a définitivement montré, grâce au spectromètre FIRAS (Mather *et al.* 1994 [150]), la présence sur tout le ciel d'un rayonnement dont le spectre est celui d'un corps noir à une température moyenne égale à 2.725 ± 0.002 K [149]. Hormis l'excés submillimétrique (*c.f.* Fig. 2.1) de brillance modeste (2% *c.f.* Fig. 2.2), la pureté spectrale du CMB est remarquable[2]. Entre le Big Bang (plus exactement un an après) et la formation des premières galaxies (un milliard d'années après), aucun phénomène (désintégration de particules, réionisation, population d'étoiles de type III, ...) n'a produit d'énergie en quantité significative (Wright *et al.* 1994 [194]). La plus forte anisotropie est de l'ordre

1. traditionnellement: Cosmic Microwave Background en anglais, bien que le maximum d'énergie de νB_ν soit à 1.34 mm

2. Les prétendus forts excés submillimétriques (10%) ont disparu avec quelques minutes de données COBE: les gaz d'échappement des fusées portant les anciens instruments seraient en cause!

de un pour mille. Elle concerne l'effet dipolaire dû à notre vitesse de déplacement par rapport à cet "ether" photonique. Cet effet a un spectre Doppler (*i.e.* égal à la dérivée première par rapport à la température de la fonction de Planck) dont la température $2.714 \pm 0.022\,\mathrm{K}$, mesurée par FIRAS (Fixsen *et al.* 1994 [112]) independamment de la température absolue précédente, est en accord avec celle-ci.

La première détection (hors dipole) d'anisotropies au niveau de un pour cent mille a été obtenue par DMR, l'instrument radio de COBE (Smoot *et al.* 1992 [173]), à des échelles de 10 degrés sur le ciel. Elle a depuis été confirmée par plusieurs autres expériences[3]. Le spectre angulaire de ces anisotropies est en accord remarquable avec les prédictions des modèles d'inflation et nécessite la présence dominante de matière non–baryonique froide dans l'Univers. Les paradoxes d'horizon et de platitude de l'Univers trouvent là une solution simple et minimale. Ainsi, le scénario de l'inflation et de la matière non-baryonique renforce et complète le paradigme du Big Bang.

La dynamique de l'Univers se résume à la relation suivante entre les paramètres cosmologiques (dans le cadre de l'hypothèse Friedmann–Robertson–Walker):

$$\Omega_0 + \lambda_0 = 1 + k_0\,, \tag{3.1}$$

où le paramètre de densité concerne toute la matière et la constante cosmologique réduite vaut λ_0. L'inflation prédit que la courbure réduite k_0 est nulle: l'Univers est spatialement euclidien. Il reste donc aux mesures futures à fixer[4] l'un des deux paramètres Ω_0 ou λ_0.

En prenant le contrepied d'une opinion répandue [182], nous pensons, sur la même base de simplicité et de minimalité, que comme Ω_0 est non négligeable (disons certainement supérieur à 0.2), alors nécessairement la constante cosmologique doit être nulle et donc $\Omega_0 = 1$. En effet, dans le cas contraire, nous, observateurs, serions à une période très précise (en échelle de temps logarithmique) dans l'évolution de l'Univers: celle où il devient dominé par cette constante alors qu'il a été dominé auparavant par la matière–rayonnement[5]. L'âge de l'Univers vaut alors $t_0 = 2/(3H_0) = 13.1\ (0.5/h)\,\mathrm{Gan}$. L'âge des plus vieux amas globulaires $11.5 \pm 1.3\,\mathrm{Gan}$ [94] est plus petit que cet âge (mais proche) si la constante de Hubble H_0 est plus petite que $60\,\mathrm{km\ s^{-1}Mpc^{-1}}$.

3. En particulier, la sensibilité de FIRAS a permis de montrer par corrélation spectro-angulaire avec DMR que le spectre moyen en fréquence des anisotropies était bien celui attendu et identique à l'effet Doppler [111], un résultat dont la portée est peut-être sous-estimée.

4. Le paramètre de décélération $q_0 = d(1/H)/dt - 1 = \Omega_0/2 - \lambda_0$, utile aux observateurs n'est pas pertinent pour les modèles d'Univers.

5. Nous reprenons et modifions l'argument de Coles [95]: demandons à quelqu'un de tenir un crayon sur une table, par la pointe. Retournons-nous et demandons lui de lacher, quand il le veut, le crayon en équilibre instable. Quelle est notre probabilité en regardant à nouveau la table à un instant quelconque ultérieur de surprendre le crayon en train de tomber?

Deux observations récentes (seulement) viennent en contradiction apparemment frontale avec ce modèle simplissime. D'une part, les mesures de distance des supernovae de type Ia [103], favorisent $\Omega_0 = 0.2$ et $\lambda_0 = 0.8$. Certains effets systématiques comme l'évolution des galaxies sous-jacentes, de la metallicité ou des lois d'extinction (grise) de la poussière peuvent influer notablement sur ce résultat (pour la plupart des SNs détectés les auteurs n'ont pas détecté d'extinction!...). D'autre part, le bilan de masse baryonique et total dans les amas de galaxies (*c.f.* Section 3.2) conduit à $\Omega_0 \sim 0.2$: ce qu'on appellé la catastrophe baryonique. Bludman (1998) [86] montre que c'est peut-être la contrainte sur la densité baryonique réduite Ω_B provenant de la nucléosynthèse primordiale (le deuxième pilier du Big Bang, peut-être le plus fragile) qu'il faut revoir. Des mesures récentes du deutérium primordial (dans les raies d'absorption de spectres de quasars) impliqueraient jusqu'à $\Omega_B \sim 0.12(h/0.5)^{-2}$, ce qui rend valide le modèle que nous résumons dans la table 3.1.

h	k_0	Ω_0	λ_0	Ω_B	t_0
0.5	0	1	0	0.10	13 Gan

TAB. 3.1 – *Les paramètres cosmologiques du modèle d'Univers simplissime*

En conclusion, la mesure des paramètres cosmologiques est un enjeu majeur de la Cosmologie moderne. Un modèle d'Univers minimal quant aux hypothèses (principe du rasoir d'Occam) n'est pas loin de satisfaire à une grande majorité d'observables. Ce serait une grande révélation que l'Univers se comporte différemment (alors qu'il est si près du but). Nous verrons en Section 3.4 quelles seront les mesures définitives (au sens où COBE l'a été dans son domaine, en quelque sorte) de ces paramètres qui sont envisagées.

3.2 Amas de galaxies et effet Sunyaev–Zel'dovich

Les amas de galaxies sont les structures de l'Univers gravitationnellement liées les plus massives (10^{13-15} $M_\odot$). Ils représentent une conjonction assez rare (rencontre de filaments ou de parois de galaxies) dans les grandes structures révélées par les comptages à trois dimensions de galaxies. Traditionnellement repéré par son contenu en galaxies (quelques centaines à quelques milliers concentrées sur quelques minutes d'arc), un amas recèle bien plus de masse dans le gaz chaud tombé dans le puits de potentiel, et encore plus dans la matière noire qui tient l'amas lié. La masse d'un amas riche se décompose ainsi en un vingtième pour les galaxies, un cinquième pour le gaz chaud et le reste pour la matière noire non-baryonique. La détection des amas proches en rayons X (1 à 10 keV) implique la présence d'un gaz diffus chaud (de densité 10^{2-4} m^{-3} et de température 10 à 150 millions de degrés). La distribution radiale du gaz donne accés au potentiel gravitationnel, tout

comme les mesure de vitesse radiale des galaxies. Ce potentiel trahit une masse (dite manquante ou sombre) sous-jacente bient supérieure à la masse des galaxies et du gaz chaud. Avec la courbe de rotation des galaxies, c'est l'une des preuves les plus éclatantes de la présence de matière non-baryonique au niveau local dans l'Univers. Au niveau global, les bilans de masse sont aussi éloquents (*c.f.* Table 3.1).

3.2.1 A quoi sert l'effet SZ?

L'effet Sunyaev–Zel'dovich (SZ, Sunyaev & Zel'dovich 1970 [177]) est le changement de brillance du rayonnement fossile à 3K à la traversée du gaz chaud des amas de galaxies, par effet Compton. Deux articles de revue sont consacrés aux développements récents sur ce sujet: Birkinshaw (1999) [84], et Rephaeli (1995) [164]. La mesure de l'effet SZ apporte une information originale et complémentaire des mesures X sur les amas de galaxies et sur l'Univers à grande échelle. Elle est donc d'un intêret à la fois astrophysique et cosmologique. En guise d'illustration, citons les enjeux scientifiques suivants:

- l'effet SZ est un témoin du 3K, indépendant du redshift si l'amas est résolu.
- il donne directement (quasiment sans modélisation) la mesure de la pression du gaz chaud le long de la ligne de visée.
- l'integrale de la mesure SZ sur l'étendue de l'amas donne directement la masse totale de gaz chaud.
- la modélisation du profil SZ donne accés au puits de potentiel gravitationnel de l'amas, qui peut être comparé aux mesures provenant des lentilles et arclets gravitationnels et aux mesures X, et qui, intégré donne la masse gravitationnelle totale de l'amas. Le rapport gaz/total donne accés à Ω_B/Ω_0.
- la comparaison de la mesure SZ et X donne la constante de Hubble H_0 sans passer par les échelles de distance classiques.
- les amas en SZ se révèlent parmi les sources les plus nombreuses dans le ciel millimétrique (voir la sous–section 3.2.2). Le comptage de ces sources mesure la fonction de masse gazeuse des amas.
- Si et quand des amas à haut redshift ($z \geq 1$) sont trouvés en SZ, ce qui n'est pas plus difficile qu'à bas redshift, contrairement aux mesures X, la contrainte sur Ω_0 ($\ll 1$) qui en découlerait serait très stricte.
- La mesure du spectre SZ, entre les domaines submillimétrique, où les amas sont vus en "positif", millimétrique et radio, où ils sont vus en négatif (le zéro est à

1.38 mm), permet d'obtenir la vitesse particulière des amas et la température du gaz, independamment des mesures X. Le champ de vitesse à grande échelle (régime linéaire) permet d'atteindre Ω_0, une fois de plus (cf. Aghanim *et al.* 1997 [78]).

Seulement une petite fraction de ces objectifs a pu être atteinte par les observations jusqu'à présent. L'effet SZ, une distortion du 3K de l'ordre de 10^{-4} plus grande que les anisotropies primordiales, est néanmoins une quantité difficile à mesurer car diffuse, faible (pour les instruments de mesure) et sujette à de nombreux effets systématiques. Trois types d'observations ont conduits à des détections que l'on peut qualifier maintenant de fiables depuis 5 ans: la détection radio antenne unique [157], interférométrique [93, 133], et la détection (sub)millimétrique bolométrique [192]. Des mesures originales ont été obtenues en France grâce à cette troisième technique, sur les instruments ballon Pronaos–SPM (première mesure de la partie SZ positive), et sol IRAM 30m (la plus haute résolution angulaire sur le SZ) avec Diabolo (*c.f.* Section 3.3). La combinaison des expérience de type bolométrique a pu donner une première mesure (Fig 3.1) spectralement complète de la distortion SZ sur l'amas Abell 2163, l'un des amas les plus chauds qui soient connus.

3.2.2 Les comptages de sources SZ

Sans utiliser le profil radial exact de l'effet SZ d'un amas, on peut calculer le flux intégré SZ d'un amas. En effet, De Luca *et al.* [22] montrent que ce flux ne dépend que de la masse totale de gaz M_G, de sa température T_e et (mollement) de son redshift z:

$$\frac{\int y d\Omega}{10^{-4}\,\mathrm{arcmin}^2} = 0.43\ h^2 (\frac{M_G}{10^{14}\,\mathrm{M}_\odot})(\frac{kT_e}{10\,\mathrm{keV}})\frac{(1+z)^3}{(\sqrt{1+z}-1)^2}\,, \tag{3.2}$$

où le flux à une fréquence $\nu = x(k_B T_{CMB}/h_P)$ vaut:

$$S_\nu = 2.28\ \mathrm{mJy}\ \frac{xe^x}{e^x-1}(x\frac{e^x+1}{e^x-1}-4)\frac{\int y d\Omega}{10^{-4}\,\mathrm{arcmin}^2}\,. \tag{3.3}$$

On comprend ainsi que toute distribution de masse des amas dans l'Univers produit (pour un instrument peu résolvant) un comptage de sources SZ. En utilisant une distribution de masse déduite des mesures par rayons X, nous trouvons par exemple à $800\,\mu$m , un nombre d'amas de:

$$N(>S_\nu) = 4.1\,\mathrm{deg}^{-2}\ (\frac{S_\nu}{10\ \mathrm{mJy}})^{-1.5}\,, \tag{3.4}$$

(et 1.7 à 2 mm avec certes des flux négatifs!).

Les amas de galaxies forment donc une population de sources submillimétriques dont le nombre est petit mais loin d'être négligeable par rapport aux comptages de galaxies (typiquement de 1 à 10% [129] pour $800\,\mu$m , et 10% à 2 mm [120]). Remarquons que les

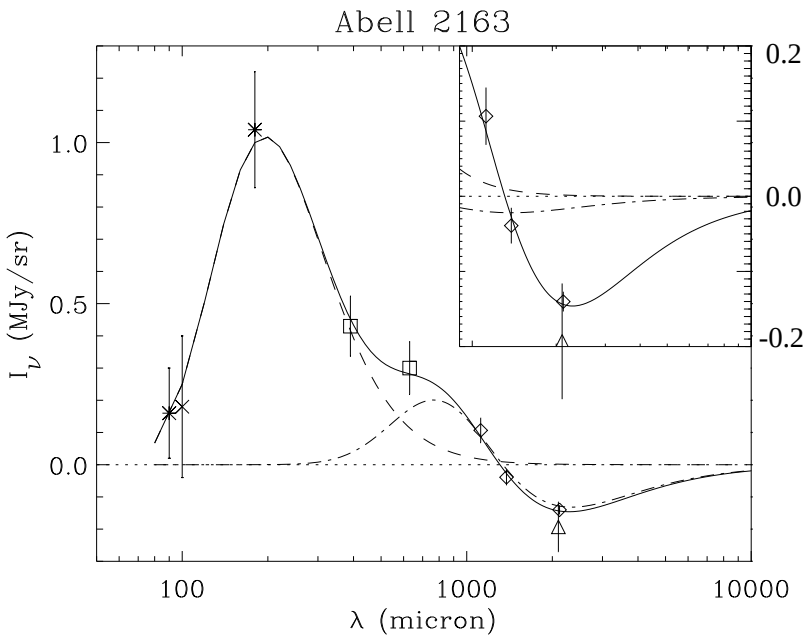

FIG. 3.1 – *Spectrophotométrie (sub)millimétrique de l'amas Abell 2163 mesurée avec* PRONAOS *par Lamarre et al. (1998) [40]. L'assemblage des mesure ballon de* PRONAOS–*SPM et sol de* SUZIE *et* DIABOLO *montre clairement pour la première fois de façon complète, le spectre SZ attendu (ligne en points-tirets) ainsi que la contamination submillimétrique par l'émission de la poussière interstellaire (longs tirets). Les différentes mesures proviennent de:* ISOPHOT *(∗),* IRAS *(×),* PRONAOS *(□),* SUZIE *(◇), et* DIABOLO *(Δ).*

instruments au sol resolvent les amas et que le problème n'est pas critique d'un point de vue observationnel.

Nous avons pu en outre calculer la contribution des amas de galaxies par l'effet SZ cinématique (qui pique à 1.38 mm), aux sources millimétriques [22]:

$$N(> S_\nu(1.38 \text{ mm})) = 27\,\text{deg}^{-2}\,(\frac{S_\nu}{1 \text{ mJy}})^{-1.5}\,. \tag{3.5}$$

L'effet SZ cinématique ne dépend plus de la température électronique des amas. Les comptages dépendent plus de la fonction de masse mal connue des groupes de galaxies. Ceci nous a amené à nous poser la question du rôle de tout effet SZ cinématique au moment de la réionisation de l'Univers ($10 < z < 4$)(Aghanim *et al.* 1996 [26]). Des conséquences importantes ont été trouvées dans le cas où la réionisation est produite

par des sources relativement rares mais puissantes en UV qui entrent en action à haut redshift. Les fameuses "bulles de quasars" primordiaux produisent des anisotropies du CMB par effet SZ cinématique: on peut aussi décrire ce phénomène par l'effet Doppler de diffusion Thomson des photons CMB sur les électrons libres de la matière ionisée. Sur une ligne de visée donnée, ce sont les premières bulles qui dominent et non la fourmilière de bulles plus proches, car l'effet croit comme la densité baryonique (en $(1+z)^3$). Ces bulles pourraient recouvrir une fraction de ciel supérieure à 10%. Si l'Univers s'est ionisé de façon inhomogène, elles constituent une des nuisances majeures pour la mesure des anisotropies à haute résolution angulaire (*c.f.* Section 3.4).

3.3 Diabolo

A partir de 1992, une équipe répartie sur 4 laboratoires (IAS Orsay, CESR Toulouse, LA Observatoire de Grenoble et CRTBT Grenoble), a réalisé un instrument de type photomètre millimétrique à deux voies (d'où le nom DIABOLO) pour la détection de l'effet SZ avec les télescopes millimétriques au sol, en parallèle aux efforts faits sur le photomètre SPM de l'expérience ballon PRONAOS. Dans sa version 1 (jusqu'en 1995), l'instrument comportait 1 bolomètre sur chacun des 2 canaux (1.2 et 2.1 mm). Dans sa version 2 définitive, il comporte maintenant 3 bolometres par canal, travaillant à 100 mK grâce à un systeme à dilution (partant de 4 K). Ceci nous permet d'atteindre la limite de diffraction à 2.1 mm et d'effectuer une modulation électrique, donc une mesure en puissance totale sur des télescopes ne disposant pas de secondaire vibrant (par exemple POM2 sur le plateau de Bure, au sud de Grenoble). Les deux canaux sont cruciaux pour la soustraction du bruit de ciel, une nuisance majeure pour l'astronomie millimétrique au sol, dûe aux fluctuations de densité de colonne de la vapeur d'eau dans l'atmosphère basse, fortement émettrice dans le domaine millimétrique [47].

Les premiers résultats obtenus avec l'aide du groupe de cosmologie de l'Université La Sapienza (Rome) à Testa Grigia (3500 m d'altitude) en Mars 1995 [47], ont été suivis par la détection de l'effet SZ sur plusieurs amas au radiotélescope de 30 m de l'IRAM (Décembre 1995) avec une résolution angulaire jamais atteinte auparavant (30 secondes d'arc) [39]. La campagne IRAM 96 n'a eu que 40 % de beau temps. Elle confirme les résultats de 95.

Les tests sur les 2 matrices de bolomètres construits par Jacques Leblanc et Noël Coron ont été faits au CRTBT en octobre 1997 puis à POM2 sur le ciel en novembre 1997. Grâce à cette préparation intense, la campagne 30 m en décembre 1997 a été particulièrement réussie tant pour l'instrument (100 mK pendant 15 jours d'affilée) que pour le temps clément à Pico Veleta. L'amas le plus brillant en X connu à ce jour RXJ1347 a été cartographié (Pointecouteau *et al.* 1999 [48]) en 13 heures d'integration avec le plus grand

effet SZ jamais mesuré de $y_0 = 10^{-3}$ (10σ env.). D'autres amas sont détectés également. En janvier 1999, les cartes ont pu être agrandies et d'autres amas ont été cartographiés.

En 1997, un programme de mesure des anisotropies primordiales a pu aussi être mené à bien avec plus de 150 heures d'integration sur un cercle autour du pole nord céleste. En effet, l'analyse par transformée de Fourier d'un signal d'anisotropie du CMB obtenu sur un cercle (ici 1 degré de rayon) peut se traiter d'une façon similaire à l'analyse en C_l désormais classique (Delabrouille *et al.* 1998 [98]). Cette technique s'avère une étape importante pour la première analyse des données de la future mission PLANCK[6]. Celle-ci, rappelons le, effectuera des cercles en puissance totale (Gaertner *et al.* 1997 [35]) comme nous venons de l'effectuer pour la première fois à POM2. Des données recueillies sur POM2, il apparait qu'une contrainte sur $\Delta T/T$ de l'ordre de 3×10^{-5} est obtenue aux échelles angulaires de 10 minutes d'arc.

3.4 Prospective

3.4.1 Matrice de bolomètres

La France (grâce à l'IAS en particulier) a un rôle leader dans l'instrument HFI du satellite PLANCK (mission M3 approuvée de l'ESA) qui devrait nous procurer un échantillon sans précédent et sans biais d'amas SZ. Les futures retombées certaines des satellites XMM et PLANCK HFI doivent conduire la communauté cosmologique française à s'interroger dés maintenant sur la pertinence et les conditions d'un observatoire SZ sol d'accompagnement et d'approfondissement.

L'instrument type utiliserait une matrice de bolomètres, dont le développement doit être envisagé dés maintenant. Dés à présent, des mosaïques (faites de détecteurs à l'unité la plupart du temps) existent, contenant jusqu'à une centaine de détecteurs (SCUBA, SHARC, SUZIE, DIABOLO version 2). L'étape suivante doit être des matrices intégrées et comportant aussi leur système de lecture sans doute multiplexé, contenant 16 par 16, ou 32 par 32 pixels. Ces recherches et développements sont clairement très similaires à ceux sur les matrices dont l'objectif est la recherche millimétrique des galaxies primordiales (*c.f.* Section 2.4) au sol ou dans l'espace (FIRST). Ces matrices doivent pouvoir à la fois bien échantillonner la tâche de diffraction (essentiel pour la cartographie et les problèmes de confusion) et couvrir le champs de vue total ou maximal du télescope (avantage multiplexe). Au sol, une sensibilité par pixel de $1\sigma = 10^{-4}$ dans le paramètre de comptonisation y pourrait être raisonnablement atteinte en une heure d'integration. L'objectif de cet instrument serait la cartographie SZ des amas [72]. Chaque amas prenant quelques dizaines d'heures d'intégration, ce sont des programmes lourds d'observations qui sont concernés.

6. `http://astro.estec.esa.nl/Planck/`

La communauté a accés à un télescope millimétrique unique par sa taille, le 30 m de l'IRAM dans l'hémisphère nord, et le 15 m du SEST dans l'hémisphère sud. Ces télescopes donneraient une résolution de 20 à 40 secondes d'arc (à 2 mm) tout-à-fait adaptée aux études fines SZ envisagées. A plus long terme, un tel instrument pourrait aussi éventuellement être utilisé en Antarctique à 800 μm : on parle de plus en plus aussi du Désert d'Atacama au Chili, futur site du ALMA, où la logistique serait nettement moins lourde.

3.4.2 Mesure des anisotropies du CMB

Grâce aux développements effectués sur une modeste expérience sol (DIABOLO, surtout avec l'aide d'Alain Benoit), nous avons pu participé à la conception technique de l'instrument haute fréquence HFI de PLANCK, ceci en particulier pour le système de lecture en puissance totale [35] et le cryostat à dilution qui peut fournir une température de 100 mK à des masses de quelques kilogrammes de bolomètres pendant de longs mois sans discontinuer. La mission PLANCK devrait fournir des cartes (sub)millimétriques avec une résolution similaire à celle qu'IRAS nous a offertes dans l'infrarouge. Une fois débarassées de leurs "gangues astrophysiques" (cirrus interstellaires, galaxies, amas, bruits divers), ces cartes devraient nous donner une vision des anisotropies primordiales meilleures que celle de DMR sur COBE, par un gain d'un facteur 50 tant en résolution angulaire qu'en sensibilité. Le spectre de puissance des anisotropies du CMB a l'empreinte des fluctuations de densité qui ont ensuite donné naissance aux galaxies. C'est la trace fossile des premiers 300 000 ans de l'Univers. A ce titre, et aussi parce que le CMB a traversé tout l'Univers observable avant d'atteindre nos détecteurs, le spectre de puissance angulaire du CMB donne accés de façon "simple" (*i.e.* sans hypothèses astrophysiques incontrolées) aux paramètres cosmologiques fondamentaux [191], qu'ils soient de nature géométriques ou physiques. Les paramètres de la Table 3.1 devrait être confirmés ou infirmés avec une précision de quelques pourcents dans les dix prochaines années[7]. En attendant le lancement de PLANCK en 2007, le projet ARCHEOPS[8] de photomètre en ballon, version réduite de PLANCK HFI et basée sur des techniques de mesure similaires, et en particulier sur une grande couverture céleste pour limiter la variance cosmique, devrait nous donner une première idée des analyses de données CMB pertinentes.

7. L'état actuel des mesures du CMB peut être consulté par exemple sur `http://astro.u-strasbg.fr/Obs/COSMO/CMB/`

8. `http://www-crtbt.polycnrs-gre.fr/archeops/general.html`

Liste des Publications et Bibliographie Générale

Seules les publications dont le numéro est suivi d'un trèfle ♣ dans la liste ci-dessous, et qui sont en rapport direct avec les points principaux de ce mémoire, sont reproduites à la fin de ce volume.

Articles

[1] Désert, F.–X., & Schatzman, E. 1986, *Astron. Astrophys.*, **158**, 135: "Physical constraints on the bipartition of the Universe"

[2] Désert, F.–X., Boulanger, F., & Shore, S. N. 1986, *Astron. Astrophys.*, **160**, 295: "Grain temperature fluctuations: a key to infrared spectra"

[3] Désert, F.–X., Boulanger, F., Léger, A., Puget, J. L., & Sellgren, K. 1986, *Astron. Astrophys.*, **159**, 328: "Nature of very small grains: PAH molecules or silicates"

[4] ♣ Désert, F.–X., & Dennefeld, M. 1988, *Astron. Astrophys.*, **206**, 227: "The link between the IRAS spectrum and near–infrared features in external galaxies"

[5] Boulanger, F., Beichman, C., Désert, F.–X., Helou, G., Pérault, M., & Ryter, C. 1988, *Astrophys. J.*, **332**, 328: "Small grains and IRAS colors"

[6] ♣ Bazell, D., & Désert, F.–X. 1988, *Astrophys. J.*, **333**, 353: "Fractal structure of cirrus clouds"

[7] Désert, F.–X., Bazell, D., & Boulanger, F. 1988, *Astrophys. J.*, **334**, 815: "An all–sky search for molecular cirrus clouds"

[8] Léger, A., Boissel, P., Désert, F.–X., & d'Hendecourt, L., 1989, *Astron. Astrophys.*, **213**, 351: "Photo–thermodissociation: I. A general mechanism for destroying molecules"

[9] ♣ Dennefeld, M., & Désert, 1990, *Astron. Astrophys.*, **227**, 379: "Detection of the 3.3 μm feature in two starburst galaxies".

[10] ♣ Désert, F.–X., Bazell, D., & Blitz, L. 1990, *Astrophys. J. (Letters)*, **355**, L51: "CO and IRAS detection of an intermediate velocity cloud"

[11] ♣ Blitz, L., Bazell, D., & Désert, F.–X. 1990, *Astrophys. J. (Letters)*, **352**, L13: "Molecular clouds without detectable CO"

[12] ♣ Désert, F.–X., Boulanger, & F., Puget, J. L. 1990, *Astron. Astrophys.*, **237**, 215: "Interstellar dust models for extinction and emission"

[13] Bernard, J. P., Boulanger, F., Désert, F.–X., & Puget, J. L. 1992:*Astron. Astrophys.*, **263**, 258: "Modelling of IR emission of interstellar clouds: 1. Emission of isolated clouds and dust abundance variations"

[14] Jenniskens, P., Ehrenfreund, P., & Désert, F.–X. 1992: *Astron. Astrophys.*, **265**, L1: "FarUV nonlinear rise extinction in relation to CH and CH^+ abundances"

[15] ♣ Jenniskens, P., & Désert, F.–X. 1993: *Astron. Astrophys.*, **274**, 465: "Complex structure in two diffuse interstellar bands"

[16] Jenniskens,P., & Désert, F.–X. 1993: *Astron. Astrophys.*, **275**, 549: "Tracing the roots of interstellar mid–infrared emission"

[17] Jenniskens, P., & Désert, F.–X. 1994, *Astron. Astrophys. Supp. Ser.*, **106**, 39 : "A survey of diffuse interstellar bands"

[18] Bernard, J.P., Boulanger, F., Désert, F.–X., Giard, M., Helou, G., & Puget, J.–L 1994 : *Astron. Astrophys.*, **291**, L5: "Dust emission of galactic cirrus from DIRBE observations"

[19] Lamarre J.–M., et al., 1994, Infrared Physics & Technology, **35**, 277, Pergamon "SPM, a submillimeter photometer for PRONAOS"

[20] Rouan, D. et al., 1994, *Astrophys. J. Suppl.*, **217**, 41, "The project SPICE: Spectro-Photometric Infrared Celestial Explorer"

[21] Boutin, A., Léger, A., Désert, F.–X., Boissel, P., & d'Hendecourt, L. 1995: *M.N.R.A.S.*, **274**, 435 : "Contestation of the hot spot model for the unidentified infrared emission bands of the interstellar medium"

[22] De Luca, A., Désert, F.–X., & Puget, J.-L. 1995, *Astron. Astrophys.*, **300**, 335 : "Source counts for the thermal and kinetic Sunyaev–Zeldovich effects on clusters of galaxies"

[23] Désert, F.–X., Jenniskens, P., & Dennefeld, M. 1995, *Astron. Astrophys.*, **303**, 223 : "Diffuse interstellar bands and UV extinction curves. The missing link."

[24] Ehrenfreund, P., Foing, B. H., d'Hendecourt, L., Jenniskens, P., & Désert, F.–X., 1995: *Astron. Astrophys.*, **299**, 213 : "Search for coronene and ovalene cations in the interstellar medium"

[25] ♣ Puget, J.–L., Abergel, A., Bernard, J.–P., Boulanger, F., Burton, W. B., Désert, F.–X., & Hartmann, D., 1996, *Astron. Astrophys.*, **308**, L5 :"Tentative detection of a cosmic far infrared background with COBE"

[26] Aghanim, N., Désert, F.–X., Puget, J.–L., & Gispert, R., 1996, *Astron. Astrophys.*, **311**, 1: "Ionization by early quasars and cosmic microwave background anisotropies"

[27] Boulanger, F., Abergel, A., Bernard, J.–P., Burton, W. B., Désert, F.–X., Hartmann, D., Lagache, G., & Puget, J.–L., 1996, *Astron. Astrophys.*, **312**, 256 :"The dust/gas correlation at high galactic latitude"

[28] Jenniskens, P., Porceddu, I., Benvenuti, P., & Désert, F.–X. 1996, *Astron. Astrophys.*, **313**, 649: "Diffuse interstellar bands: resolved rotational band structure at 5850 A"

[29] Cesarsky, C. J., Abergel, A., Agnèse, P. *et al.* , 1996, *Astron. Astrophys.*, **315**, L32: "ISOCAM in flight"

[30] Sauvage, M., Blommaert, J., Boulanger, F., Cesarsky, C. J., Cesarsky, D., Désert, F.–X., Elbaz, D., Gallais, P., Joncas, G., Metcalfe, L., Okumura, K., Ott, S., Siebenmorgen, R., Starck, J.–L., Tran, D., & Vigroux, L., 1996, *Astron. Astrophys.*, **315**, L89: "ISOCAM mapping of the Whirlpool galaxy M51"

[31] Boulanger, F., Reach, W. T., Abergel, A., Bernard, J.–P., Cesarsky, C. J., Cesarsky, D., Désert, F.–X., Falgarone, E., Lequeux, J., Metcalfe, L., Pérault, M., Puget, J.–L., Rouan, D., Sauvage, M., Tran, D., & Vigroux, L., 1996, *Astron. Astrophys.*, **315**, L325: "Mid–Infrard imaging spectroscopy in Ophiuchus"

[32] Abergel, A., Bernard, J.–P., Boulanger, F., *et al.* , 1996, *Astron. Astrophys.*, **315**, L329: "ISOCAM mapping of the ρOphiuci main cloud"

[33] Reach, W. T., Abergel, A., Boulanger, F., Désert, F.–X., Pérault, M., Bernard, J.–P., Blommaert, J., Cesarsky, C. J., Cesarsky, D., Metcalfe, L., Puget, J.–L., Sibille, F., & Vigroux, L., 1996, *Astron. Astrophys.*, **315**, L381: "Mid–Infrared spectrum of the zodiacal light"

[34] Taniguchi, Y., Cowie, L. L., Sato, Y., Sanders, D. B., Kawara, K., Joseph, R., Okuda, H., Wynn–Williams, C. G., Matsumoto, T., Chambers, K. C., Wakamatsu, K., Désert, F.–X., Sofue, Y, & Matsuhara, H., 1997, *Astron. Astrophys.*, **328**, L9: "ISOCAM 7 μm deep survey of the Lockman Hole: A mid-infrared search for primeval galaxies"

[35] Gaertner, S., Benoit, A., Lamarre, J.–M., Giard, M., Bret, J.–L., Chabaud, J.–P., Désert, F.–X., Faure, J.–P., Jegoudez, G., Lande, J., Leblanc, J., LePeltier, J.–P., Narbonne, J., Piat, M., Pons, R., Serra, G., Simiand, G., 1997, *A&A Supp. Ser.*, **126**, 151 : "A new readout system for bolometers with improved low frequency stability"

[36] Aussel, H., Gerin, M., Boulanger, F., Désert, F.–X., Casoli, F., Cutri, R., & Signore, M., 1998, *Astron. Astrophys.*, **334**, L73: "The mid infrared spectrum of the hyperluminous galaxies IRAS F15307+3252 and the Cloverleaf"

[37] LeBertre, T., LeSidaner, Lagache, G., Mauron, N., Epchtein, N., Boulanger, F., & Désert, F.–X., 1998, *Astron. Astrophys.*, **335**, 287

[38] Starck, J.–L., Abergel, A., Aussel, H., Sauvage, M., Gastaud, R., Claret, A., Désert, X., Delattre, C., & Ott, S., 1999, *Astron. Astrophys. Supp. Ser.*, **134**, 135, "ISOCAM data processing"

[39] ♣ Désert, F.–X., Benoit, A., Gaertner, S., Bernard, J.–P, Coron, N., Delabrouille, J., de Marcillac, P., Giard, M., Lamarre, J.–M., Lefloch, B., Puget, J.–L.& Sirbi, A., 1998, *New Astronomy*, **3**, 655, "Observations of the Sunyaev–Zel'dovich effect at high angular resolution towards the galaxy clusters A665, A2163 and CL0016+16", Astro-ph/9808270

[40] Lamarre, J.–M., Giard, M., Pointecouteau, E., Bernard, J.–P., Serra, G., Pajot, F., Désert, F.–X., Ristorcelli, I., Torre, J.–P., Church, S., Coron, N., Puget, J.–L., Bock, J. J., 1998, *ApJ*, **507**, L5, "First measurement of submillimetre Sunyaev–Zel'dovich effect", Astro-ph/9806128

[41] ♣ Désert, F.–X., Puget, J.–L., Clements, D. L., Pérault, M., Abergel, A., Bernard, J.–P., & Cesarsky, C. J., 1999, *Astron. Astrophys.*, **342**, 363, "A classical approach to faint extragalactic source extraction from ISOCAM deep surveys. Application to the Hubble Deep Field", Astro-ph/9809004

[42] Flores, H., Hammer, F., Désert, F.–X., Césarsky, C., Thuan, T., Crampton, D., Eales, S., Le Fèvre, O., Lilly, S. J., Omont, A., & Elbaz, D., 1999, *Astron. Astrophys.*, **343**, 389, "Deep Galaxy survey at 6.75 μm with the ISO satellite"

[43] Flores, H., Hammer, F. Thuan, C., Désert, F.–X., Césarsky, C., Crampton, D., Eales, S., Le Fèvre, O., Lilly, S. J., Omont, A., & Elbaz, D., 1999, *Astrophys. J.*, Sous presse, "Observation at 15 μm with the ISO satellite of the CFRS field at 1415+52: Morphology and Spectral Energy Distribution"

[44] Clements, D. L., Désert, F.–X., Franceschini, A., Reach, W. T., Baker, A. C., Davies, J. K., & Césarsky, C., 1998, *Astron. Astrophys.*, Sous presse, "A deep 12 μm survey with ISOCAM"

[45] Lagache, G., Abergel, A., Boulanger, F., Désert, F.–X., & Puget, J.–L., 1999, *Astron. Astrophys.*, **344**, 322, "First detection of the warm ionised medium dust emission. Implication for the cosmic far–infrared background"

[46] Puget, J.–L., Lagache, G., Clements, D. L., Reach, W. T., Aussel, H., Dole, H., Bouchet, F. R., Césarsky, C., Désert, F.–X., Elbaz, D., Franceschini, A., & Guiderdoni, B., 1998, *Astron. Astrophys.*, Sous presse, "FIRBACK survey: I. A deep survey at 175 μm with ISO"

[47] ♣ Benoit, A., Zagury, F., Coron, N., Bernard, J.–P., Crussaire, J.–P., Dambier, G., de Bernardis, P., Delabrouille, J., De Luca, A., de Marcillac, P., De Petris, M., Désert, F.-X., Giard, M., Jegoudez, G., Lamarre, J.–M., Leblanc, J., LePeltier, J.–P., Leriche, B., Mainelli, G., Narbonne, F., Pajot, F., Pons, R., Puget, J.-L., Pujol, S., Recouvreur, G., Serra, G., Torre, J.–P., Soglasnova, V., & Vozzi, B., 1999, *Astron. Astrophys. Supp. Ser.*, Soumis, "Calibration and First light of the Diabolo photometer at the Millimetre Testa Grigia Observatory"

[48] Pointecouteau, E., Giard, M., Benoit, A., Désert, F.-X., Aghanim, N., Coron, N., Lamarre, J.-M., Delabrouille, J., 1999, *Astrophys. J. (Letters)*, Soumis, "A Sunyaev-Zel'dovich map of the massive core in the luminous X-ray cluster RXJ1347-1145"

Compte-rendus de conférences

[49] Blanchard, A., & Désert, F.–X., 1984, in *Proceed. of the Aussois Meeting* (journées relativistes), (Springer Verlag: Berlin): "The cosmological constant"

[50] Désert, F.–X., & Puget, J. L., 1985, in *Proceed. of the third Rome meeting on Cosmic Background Radiation*, "Cosmological effects of the near–infrared features in the spectra of galaxies", p.239.

[51] Désert, F.–X., 1986, in *Light on Dark Matter*, First IRAS conference, ed. Israel, F. P., (Reidel: Dordrecht):"Infrared spectra and dust temperature fluctuations"

[52] Désert, F.–X., Boulanger, F., & Pérault, M., 1987, in *Comets to Cosmology*, Third IRAS conference, ed. Lawrence, A., (Springer Verlag: Berlin): "A post–IRAS interstellar dust model"

[53] Bazell, D., Blitz, L., & Désert, F.–X., 1988, in *Proceed. of IAU Symp. 135 Interstellar Dust*, ed. Allamandola, L., (Kluwer: Dordrecht) "Does CO trace H_2 at high galactic latitude?"

[54] Désert, F.–X., 1989, in *Chemistry in Space*, ed. Greenberg, J. M. & Pironello, V. , "Very small particles in the interstellar medium"

[55] Désert, F.–X., Puget, J. L., 1990, in *Proceed. of the IAU Symp. 139 The Galactic and Extragalactic Background Radiation*, eds. S. Bowyer & Leinert, C., p. 381 , "The infrared background due to galaxies"

[56] Désert, F.–X., 1991, (papier invité) in *Proceed. of IAU Symp. 144 The Interstellar disk–halo connection in galaxies*, ed. Bloemen, H., "The high–latitude sky at IR, optical, and UV wavelengths", p. 149.

[57] Pajot, F., Bernard, J.–P., Désert, F.–X., Lamarre, J.–M., 1992, in *Proceed. of Blois Conference: Physical Cosmology*, ed. Blanchard, A., Editions Frontières (Gif: France): "Observations in the submillimeter range of the Sunyaev–Zeldovich effect with the SPM–PRONAOS balloon experiment"

[58] Boulanger, F. & Désert, F.–X., 1992, (papier invité) in *The Infrared and Submillimeter Sky after COBE*, ed. Signore M., Dupraz, Ch., (Kluwer: Dordrecht), "Infrared Emission from the Galaxy", p. 263.

[59] Désert, F.–X., 1993, (papier invité) in *COSPAR 1992, Washington D.C. Infrared and submillimeter Astronomy*, ed. Cesarsky, C., Advances in Space Research, (Pergamon Press Oxford: England), **13**, (12)453: "Interstellar dust models"

[60] Désert, F.–X., 1993, (papier invité) in *8th IAP Meeting July 1992 : First light in the Universe*, ed. Rocca–Volmerange & al., "Dust extinction and emission in starburst galaxies"

[61] ♣ Pérault, M., Désert, F.–X., Abergel, A., Boulanger, F., Dupraz, Ch., Cesarsky, C., & Vigroux, L., 1993, in SPIE Conference "Infrared spaceborne remote sensing", San Diego (USA) 11–16 July 1993:"ISOCAM calibration facility and pre–flight characterization"

[62] Désert, F.–X., de Luca, A., Lamarre, J.–M. & Puget J.–L., 1993, in Proceed. of *9th IAP meeting on Cosmic Velocity Fields*, ed. F. R. Bouchet, & M. Lachièze–Rey, (Edt. Frontières: Gif): "How to measure peculiar velocity fields on a very large distance scale?"

[63] De Luca, A., Bernard, J.–P., Désert F.–X., Lamarre, J.–M., Pajot, F., & Torre, J.–P., 1993, in Proceed. of *NATO ASI "Cosmological Aspects of X–ray clusters of galaxies"*: "PRONAOS–SPM: a balloon–borne experiment well adapted to measure the short wavelength part of the Sunyaev–Zeldovich effect"

[64] ♣ Désert, F.–X., 1995, Space Science Reviews, **74**, in *Infrared and submillimetre space missions in the coming decade* eds. H. Thronson Jr., M. Sauvage, P. Gallais, & L. Vigroux (Kluwer:Dordrecht): "OLBERS: an interplanetary probe to study visible and infrared diffuse backgrounds; an answer to the call for mission concepts for the ESA follow–up to Horizon 2000"

[65] Lamarre, J.–M.,Désert, F.–X., Kirshner, T., 1995, Space Science Reviews, **74**, or in *Infrared and submillimetre space missions in the coming decade* eds. H. Thronson Jr., M. Sauvage, P. Gallais, & L. Vigroux (Kluwer:Dordrecht): "Background limited infrared and submillimetre space instruments"

[66] Désert, F.–X., & Jenniskens, P., 1995, p. 97, in *The diffuse interstellar bands* eds. A.G.G.M. Tielens & T.P. Snow, (Kluwer: Dordrecht): "DIBs and UV extinction"

[67] Jenniskens, P., & Désert, F.–X., 1995, p. 39, in *The diffuse interstellar bands* eds. A.G.G.M. Tielens & T.P. Snow, (Kluwer: Dordrecht): "The diffuse interstellar band spectrum"

[68] Boulanger, F., Abergel, A., Bernard, J.–P., Burton, W. B., Désert, F.–X., Hartmann, D., Lagache, G., & Puget, J.–L., 1996, COBE Workshop "Unveiling the Cosmic Background" ed. E. Dwek, AIP Conf. Proc. 348 p.87 :"Far-infrared emission from the Galaxy in extra-galactic windows"

[69] Désert, F.–X., Abergel, A., Bernard, J.–P., Boulanger, F., Burton, W. B., Hartmann, D., & Puget, J.–L., 1996, COBE Workshop "Unveiling the Cosmic Background" ed. E. Dwek, AIP Conf. Proc. 348, p.96:"Limits on the far infrared CIBR from DIRBE, FIRAS and HI surveys"

[70] Désert, F.–X., Giard, M., & Benoit, A., 1997, Proc. of the ESA Symp. "The Far Infrared and Submillimetre Universe", 15-17 April 1997, Grenoble, France, ESA SP-401, p259: "Observations of the hot gas in clusters of galaxies with Diabolo through the Sunyaev-Zel'dovich effect"

[71] ♣ Désert, F.–X, Césarsky, C., Elbaz, D., Puget, J.–L., Franceschini, A.,& the ISOCAMGT deep survey consortium 1999, in *Proceed. of Xth Rencontres de Blois 1998 Conference: The Birth of Galaxies*, ed. Guiderdoni, B., *et al.* , Sous presse: "On the Nature of Mid–Infrared ISOCAM deep survey galaxies"

[72] ♣ Désert, F.–X., & Benoit, A., 1999, IRAM Newsletter, January 1999, Nr. 38, `http://iram.fr/ARN/jan99/jan99.html`,
"The case for a bolometric millimetre camera at the IRAM 30m telescope", astro-ph/9901414

[73] Elbaz, D., Aussel, H., Cesarsky, C. J., Desert, F. X., Fadda, D., Franceschini, A., Harwit, M., Puget, J. L., & Starck J. L., 1999, in 'The Universe as seen by ISO', eds. P. Cox and M.F. Kessler, 1998, UNESCO, Paris, ESA Special Publications series (SP-427), Sous presse, "Isocam Extragalactic Mid-Infrared Deep Surveys Unveiling Dust-Enshrouded Star Formation In The Universe", astro-ph/9902229

[74] Dole, H., Lagache, G., Puget, J.-L., *et al.* , 1999, in 'The Universe as seen by ISO', eds. P. Cox and M.F. Kessler, 1998, UNESCO, Paris, ESA Special Publications series (SP-427), Sous presse, "FIRBACK Far Infrared Survey with ISO: Data Reduction, Analysis and First Results", astro-ph9902122

vskip 5pt

Grand Public

[75] Désert, F.–X., 1995, in *Le grand journal des Sciences 1995* eds. Plon, p. 183: "L'Univers nous a encore caché son âge"

Bibliographie Générale

[76] Abergel, A., Boulanger, F., Mizuno, A., & Fukui, Y., 1994, *Astrophys. J. (Letters)***423**, L59

[77] Abergel, A., Boulanger, F., Delouis, J. M., Dudziak, G., & Steinling, S., 1996, *Astron. Astrophys.*, **309**, 245

[78] Aghanim, N., De Luca, A., Bouchet, F. R., Gispert, R., & Puget, J.–L., 1997, *Astron. Astrophys.*, **325**, 9

[79] Andriesse, C. D., 1978, *Astron. Astrophys.*, **66**, 169

[80] Aussel, H., Cesarsky, C. J., Elbaz, D., & Starck, J. L., 1999, *Astron. Astrophys.*, **342**, 313

[81] Bertin, E., Dennefeld, M., & Moshir, M., 1997, *Astron. Astrophys.*, **323**, 685

[82] Biller, S. D., Buckley, J., Burdett, A. *et al.* , 1999, *Phys. Rev. Lett.*, Sous presse, astro-ph/9802234

[83] Biller, S. D., Akerlof, C. W., Buckley, J., *et al.* , 1995, *Astrophys. J.*, **445**, 227

[84] Birkinshaw, M., 1999, *Physics Report*, /press, astro-ph/9808050

[85] Boisse, P., 1990, *Astron. Astrophys.*, **228**, 483

[86] Bludman, S. A., 1998, *Astrophys. J.*, **508**, 535

[87] Boulade, O., Sauvage, M., Altieri, B., *et al.* , 1996, *Astron. Astrophys.*, **315**, L85

[88] Boulanger, F., Boissel, P., Cesarsky, D. & Ryter, C., 1998, *Astron. Astrophys.*, **339**, 194

[89] Boulanger, F., Prevot, M. L., & Gry, C., 1994, *Astron. Astrophys.*, **284**, 956

[90] Boulanger, F., Falgarone, E., Puget, J.–L., & Helou, G., 1990, *Astrophys. J.*, **364**, 136

[91] Braatz, J. A., Wilson, A. S., Gezari, D. Y., Varosi, F., & Beichman, C. A., 1993, *Astrophys. J. (Letters)*, **409**, 5L

[92] Burigana, C., Danese, L., De Zotti, G., Franceschini, A., Mazzei, P., & Toffolatti, L., 1997, *M.N.R.A.S.*, **287**, L17

[93] Carlstrom, J. E., Joy, M., & Grego, L., 1996, *Astrophys. J. (Letters)*, **456**, 75L (*c.f.* erratum: **461**, L59)

[94] Chaboyer, B., 1998, *Physics Report*, Sous presse, astro-ph/9808200

[95] Coles, P., 1998, in *La Recherche: Naissance et histoire du cosmos*, Hors-série, Avril 1998, p. 72.

[96] De Frees, D. J., Miller, M. D., Talbi, D., *et al.* , 1993, *Astrophys. J.*, **408**, 530

[97] De Grijp, M. H. K., Miley, G. K., Lub, J., & De Jong, T., 1985, *Nature*, **314**, 240

[98] Delabrouille, J., Gorski, K. & Hivon, E., 1998, *M.N.R.A.S.*, **298**, 445

[99] Dennefeld, M., *et al.* 1999, En préparation

[100] Draine, B. T., & Lee, H. M. 1984, *Astrophys. J.*, **285**, 89

[101] Draine, B. T., & Anderson, N. 1985, *Astrophys. J.*, **292**, 494

[102] Eales, S., Lilly, S., Gear, W., *et al.* , 1999, *Astrophys. J.*, Soumis, astro-ph/9808040

[103] Efstathiou, G., Bridle, S. L., Lasenby, A. N., *et al.* , 1999, *M.N.R.A.S.*, **303**, L47

[104] Elbaz, D., Arnaud, M., & Vangioni–Flam, E., 1995, *Astron. Astrophys.*, **303**, 345

[105] Ellis, R., 1998, *Nature*, **395**, Suppl., A3

[106] Fabian, A. C., Barcons, X., Almaini, O., & Iwasawa, K., 1998, *M.N.R.A.S.*, **297**, L11

[107] Fabian, A. C., & Iwasawa, K., 1999, *M.N.R.A.S.*, **303**, L34

[108] Falgarone, E., 1995, in ASP Conf. Ser. Vol. 80, *The physics of the Interstellar Medium and Intergalactic Medium*, 158

[109] Falgarone, E., & Phillips, T. G., 1991, in IAU 147 Proceed. *Fragmentation of Molecular Clouds and Star Formation*, eds E. Falgarone, F. Boulanger, & G. Duvert, (Kluwer:Netherlands), p. 119

[110] Fixsen, D. J., Dwek, E., Mather, J. C., Bennett, C. L., & Shafer, R. A., 1998, *Astrophys. J.*, **508**, 123

[111] Fixsen, D. J., Hinshaw, G., Bennett, C. L., & Mather, J. C., 1997, *Astrophys. J.*, **486**, 623

[112] Fixsen, D. J., Cheng, E. S., Cottingham, D. A., *et al.* , 1994, *Astrophys. J.*, **420**, 445

[113] Foing, B., & Ehrenfreund, P., 1994, Nature, **369**, 296

[114] Gautier III, T. N., Boulanger, F., Pérault, M., & Puget, J.–L., 1992, *Astron. J.*, **103**, 1313

[115] Ghosh, S. K., Drapatz, S., & Peppel, U. C., 1986, *Astron. Astrophys.*, **167**, 341

[116] Giard, M., Serra, G., Caux, E., Pajot, F., Lamarre, J.–M., 1989, *Astron. Astrophys.*, **215**, 92

[117] Giard, M., Lamarre, J.–M., Pajot, F., Serra, G., 1994, *Astron. Astrophys.*, **286**, 203

[118] Greenberg, J. M. 1968, in *Stars and Stellar Systems*, Vol. 7, Nebulae and Interstellar Matter, eds. B. M. Middlehurst, L. H., Chicago University Press, p. 221

[119] Guhathakurta, P., & Draine, B. T., 1989, *Astrophys. J.*, **345**, 230

[120] Guiderdoni, B., Hivon, E., Bouchet, F. R., & Maffei, B., 1998, *M.N.R.A.S.*, **295**, 877

[121] Hartmann, D., Magnani, L., & Thaddeus, P., 1998, *Astrophys. J.*, **492**, 205

[122] Hartmann, D., & Burton, W. B., 1996, *Atlas of Galactic Neutral Hydrogen*, Cambridge University Press

[123] Harwit, M., 1999, *Astrophys. J. (Letters)*, **510**, L83

[124] Hauser, M. G., Arendt, R. G., Kelsall, T., *et al.* , 1998, *Astrophys. J.*, **508**, 35

[125] Helou, G., Ryter, C., & Soifer, B. T., 1991, *Astrophys. J.*, **376**, 505

[126] Helou, G., 1986, *Astrophys. J. (Letters)*, **311**, 33

[127] Herbig, G. H., 1995, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **33**, 19

[128] Hong, S. S, & Greenberg, J. M., 1980, *Astron. Astrophys.*, **88**, 194

[129] Hughes, D. H., Serjeant, S., Dunlop, J., *et al.* , 1998, *Nature*, **394**, 241

[130] First ISO results, Special Issue, 1996, *Astron. Astrophys.*, **315**

[131] Joblin, C., Léger, A., & Martin, P., 1992, *Astrophys. J. (Letters)*, **393**, L79

[132] Jones, B., & Rodriguez-Espinosa, J. M., 1984, *Astrophys. J.*, **285**, 580

[133] Jones, M., Saunders, R., Alexander, P., *et al.* , 1993, *Nature*, **365**, 320

[134] Kameswara Rao, N., & Lambert, D., L., 1993, *M.N.R.A.S.*, **263**, L27

[135] Krelowski, J., & Sneden, C., 1993, Publ. Astron. Soc. Pac., **105**, 1141

[136] Lagache, G., Abergel, A., Boulanger, F., & Puget, J.–L., 1998, *Astron. Astrophys.*, **333**, 709

[137] Lagache, G., 1998, Thèse de l'Université Paris XI, "Emission en infrarouge lointain et sub-millimétrique: du milieu interstellaires aux galaxies lointaines"

[138] Le Coupanec, P., Rouan, D., Moutou, C., & Léger, A., 1999, *Astron. Astrophys.*, Sous presse

[139] Léger, A., & Puget, J.–L., 1984, *Astron. Astrophys.*, **137**, L5

[140] Léger, A., & d'Hendecourt, L., 1985, *Astron. Astrophys.*, **146**, 81

[141] Léger, A., d'Hendecourt, L., & Défourneau, D., 1995, *Astron. Astrophys.*, **293**, L53

[142] Leinert, Ch., Bowyer, S., Haikala, L. K., *et al.* , 1998, *Astron. Astrophys. Supp. Ser.*, **127**, 1

[143] Leisawitz, D., & Hauser, M. G., 1988, *Astrophys. J.*, **332**, 954

[144] Levine, D. A., Lonsdale, C. J., Hurt, R. L., *et al.* , 1998, *Astrophys. J.*, **504**, 64

[145] Lilly, S. J., Le Fèvre, O., Crampton, D., Hammer, F., & Tresse, L., 1995, *Astrophys. J.*, **455**, 50

[146] Lonsdale, C., Hacking, P. B., Conrow, T. P., & Rowan–Robinson, M., 1990, *Astrophys. J.*, **358**, 60

[147] Madau, P., Ferguson, H. C., Dickinson, M. E., Giavalisco, M., Steidel, C. C., & Fruchter, A., 1996, *M.N.R.A.S.*, **283**, 1388

[148] Madau, P., Pozzetti, L, & Dickinson, M., 1998, *Astrophys. J.*, **498**, 106

[149] Mather, J. C., Fixsen, D. J., Shafer, R. A., *et al.* , 1999, *Astrophys. J.*, **512**, 511

[150] Mather, J. C., Cheng, E. S., Cottingham, D. A., *et al.* , 1994, *Astrophys. J.*, **420**, 439

[151] Mathis, J. S., Rumpl, W., and Nordsieck, K. H., 1977, *Astrophys. J.*, **217**, 425

[152] Mazzarella, J. M., Voit, G. M, Soifer, B. T., Matthews, K., Graham, J. R., Armus, L., & Shupe, D., 1994, *Astron. J.*, **107**, 1274

[153] Moorwood, A. F. M., 1986, *Astron. Astrophys.*, **166**, 4

[154] Moorwood, A. F. M., Lutz, D., Oliva, E., *et al.* , 1996, *Astron. Astrophys.*, **315**, L109

[155] Mushotzky, R. F., & Loewenstein, M., 1997, *Astrophys. J. (Letters)*, **481**, L63

[156] Myers, S. T., 1998, *Amer. Astr. Soc. Meeting 192*, **192**, 4812

[157] Myers, S. T., Baker, J. E., Readhead, A. C. S., Leitch, E. M, & Herbig, T., 1997, *Astrophys. J.*, **485**, 1

[158] Papoular, R., Conrad, J., Giuliano, M., *et al.* , 1989, *Astron. Astrophys.*, **217**, 204

[159] Papoular, R., Guillois, O., Nenner, I., & Reynaud, C., 1995, *Astron. Astrophys.*, **293**, 562

[160] Pozzetti, L., Madau, P., Zamorani, G., Ferguson, H. C., & Bruzual, G., 1998, *M.N.R.A.S.*, **298**, 1133

[161] Puget, J.–L., Léger, A., & Boulanger, F., 1985, *Astron. Astrophys.*, **142**, 19

[162] Puget, J.–L., Léger, A., & d'Hendecourt, L., 1995, *Astron. Astrophys.*, **293**, 559

[163] Reach, W. T., Wall, W., & Odegard, N., 1998, *Astrophys. J.*, **507**, 507

[164] Rephaeli, Y., 1995, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **33**, 541

[165] Roche, P. F., Aitken, D. K., Smith, C. H., & Ward, M. J., 1991, *M.N.R.A.S.*, **248**, 606

[166] Rowan–Robinson, M. , 1986, *M.N.R.A.S.*, **219**, 737

[167] Rowan–Robinson, M. , & Crawford, J., 1989, *M.N.R.A.S.*, **238**, 523

[168] Rowan–Robinson, M. , & Efstathiou, A., 1993, *M.N.R.A.S.*, **263**, 675

[169] Ryter, C. E., & Puget, J. L. 1977, *Astrophys. J.*, **215**, 77

[170] Salama, F., & Allamandola, L. J., 1992, *Astrophys. J.*, **395**, 301

[171] Scarrott, S. M., Watkin, S., Miles, J. R., & Sarre, P. J., 1992, *M.N.R.A.S.*, **255**, 11P

[172] Sellgren, K., Werner, M. W., Dinerstein, H. L, 1983, *Astrophys. J. (Letters)*, **271**, L13

[173] Smoot, G. F., Bennett, C. L, Kogut, A., *et al.* , 1992, *Astrophys. J.*, **396**, 1

[174] Sodroski, T., J., Odegard, N., Arendt, R. G., Dwek, E., Weiland, J. L., Hauser, M. G., Kelsall, T., 1997, *Astrophys. J.*, **480**, 173

[175] Soifer, B. T., Neugebauer, G., & Houck, J. R., 1987, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **25**, 187

[176] Soifer, B. T., & Neugebauer, G., 1991, *Astron. J.*, **101**, 354

[177] Sunyaev, R. A., & Zel'dovich, Ya. B., 1970, *Ap. Sp. Sci.*, **7**, 3

[178] Tanaka, M., Matsumoto, T., Murakami, H., Kawada, M., Noda, M., Matsuura, S, 1996, PASJ **48L**, 53

[179] Toller, G., 1981, PhD Thesis

[180] Tran, Quang Dan, 1998, Thèse de l'Université Paris XI, 3 Mars 1998, p.105

[181] Tulej, M., Kirkwood, D. A., Pachkov, M., & Maier, J. P., 1998, *Astrophys. J. (Letters)*, **506**, L69

[182] Turner, M. S., 1999, in proceedings of *Type Ia Supernovae: Theory and Cosmology* (held at the University of Chicago, 29 - 31 October 1998), eds J. Niemeyer and J. Truran (Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK), astro-ph/9904049

[183] Verstraete, L., & Léger, A., 1992, *Astron. Astrophys.*, **266**, 513

[184] Verstraete, L., Puget, J.–L., Falgarone, E., Drapatz, S., Wright, C. M., & Timmermann, R., 1996, *Astron. Astrophys.*, **315**, L337

[185] Vigroux, L., Mirabel, F., Altiéri, B., *et al.* , 1996, *Astron. Astrophys.*, **315**, L93

[186] Vogelaar, M. G. R., Wakker, B. P., & Schwarz, U. J., 1991, in IAU 147 Proceed. *Fragmentation of Molecular Clouds and Star Formation*, eds E. Falgarone, F. Boulanger, & G. Duvert, (Kluwer:Netherlands), p. 508.

[187] Voit, G. M., 1992, *M.N.R.A.S.*, **258**, 841

[188] Voit, G. M., 1991, *Astrophys. J.*, **379**, 122

[189] Wall, W. F., Reach, W. T., Hauser, M. G., *et al.* , 1996, *Astrophys. J.*, **456**, 566

[190] Watson, J. K., & Meyer, D. M., 1996, *Astrophys. J. (Letters)*, **473**, 127L

[191] White, M., Scott, D., & Silk, J., 1994, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **32**, 319

[192] Wilbanks, T. M., Ade, P. A. R., Fischer, M. L., Holzapfel, W. L., & Lange, A. E., 1994, *Astrophys. J. (Letters)*, **427**, L75

[193] Witt, A. N., & Boroson, T. A., 1990, *Astrophys. J.*, **355**, 182

[194] Wright, E. L., Mather, J. C., Fixsen, D. J., *et al.* , 1994, *Astrophys. J.*, **420**, 450

[195] Xu, Cong, & Helou, G., 1994, *Astrophys. J.*, **426**, 109

[196] Xu, Cong, Hacking, P., Fang, F., *et al.* , 1998, *Astrophys. J.*, **508**, 576

blanc