

UNIVERSITÉ PARIS-SUD

ECOLE DOCTORALE
ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE D'ÎLE DE FRANCE
LABORATOIRE AIM, CEA SACLAY

DISCIPLINE : ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue le 13 Décembre 2013 par

Aurélie RÉMY-RUYER

**Probing the impact of metallicity
on the dust properties in galaxies**

Etude de l'impact de la métallicité sur
les propriétés de la poussière dans les galaxies.
(Résumé en français)

Directrice de thèse : Dr. Suzanne MADDEN (AIM, CEA Saclay)

Composition du jury :

Président du jury : Pr. Guillaume PINEAU DES FORÊTS (Institut d'Astrophysique Spatiale)

Rapporteurs : Pr. Daniel DALE (University of Wyoming)
Pr. François-Xavier DÉSSERT (Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble)

Examineurs : Pr. Maarten BAES (Sterrenkundig Observatorium, Universiteit Gent)
Pr. Jonathan DAVIES (Cardiff University)

Invitée : Dr. Caroline BOT (Observatoire de Strasbourg)

Le travail présenté dans ce manuscrit s'inscrit dans le contexte vaste et très général de l'évolution des galaxies. Les processus par lesquels les galaxies évoluent, depuis les toutes premières galaxies de l'Univers primordial jusqu'aux systèmes actuels, sont encore largement débattus. Les fondements de cette évolution reposent sur l'histoire de la formation stellaire des galaxies. Comment se forment les étoiles, et à quel taux ? Qu'est-ce qui contrôle l'efficacité à laquelle se forment les étoiles ? Comment cette efficacité varie dans le temps ? De quelle manière cela affecte-t-il ensuite la galaxie ?

Les galaxies sont composées principalement d'étoiles et d'un milieu interstellaire (MIS) fait de gaz et de poussière. L'interaction continue entre les étoiles et le MIS est l'un des principaux moteurs de l'évolution des galaxies. Le MIS joue un rôle clé dans cette évolution, étant le réceptacle des éjections stellaires et le site de naissance des étoiles. Il contient donc l'empreinte de tous les processus astrophysiques se produisant dans une galaxie. Ces processus astrophysiques peuvent être étudiés via des observations du MIS des galaxies à différentes longueurs d'onde d'un bout à l'autre de la distribution spectrale d'énergie (SED). La SED est un outil puissant pour sonder l'état physico-chimique actuel d'une galaxie, avec cette information historique intégrée sur toute la durée de vie de la galaxie.

La poussière interstellaire est présente dans la plupart des phases du MIS, des régions chaudes ionisées entourant les jeunes étoiles, aux cœurs denses des nuages moléculaires. Étant donné que la poussière est formée principalement à partir des métaux disponibles dans le MIS, le contenu en poussière d'une galaxie permet de suivre son évolution interne par les processus d'enrichissement en métaux. La métallicité est donc un paramètre clé dans l'étude de l'évolution des galaxies et est au cœur de ce travail. La poussière influence également la formation stellaire ultérieure et a donc un impact important sur la SED totale de la galaxie : l'émission stellaire absorbée par la poussière dans les longueurs d'onde ultra-violettes (UV) et visibles, est réémise dans le domaine infrarouge (IR) par les grains de poussière. Dans notre Galaxie, la poussière recycle ainsi environ 30% de la puissance stellaire émise, et cela peut aller jusqu'à 99% de la puissance stellaire émise dans une galaxie à flambée de formation d'étoile. L'étude de l'émission IR des galaxies nous fournit donc de précieuses informations sur les propriétés de la poussière dans les galaxies et sur leur activité globale de formation stellaire.

Avec l'apogée des missions spatiales en IR, comme par exemple *ISO*, *IRAS*, *Spitzer*, *AKARI* et, plus récemment, *Herschel*, des progrès considérables ont été faits sur la caractérisation des propriétés des poussières dans les galaxies. Depuis quelques dizaines d'années maintenant, l'astronomie infrarouge a révolutionné notre compréhension des propriétés des poussières dans les galaxies. La poussière n'est plus seulement considérée comme la responsable de l'obscurcissement de l'émission stellaire, mais également comme un traceur puissant de la formation d'étoiles et de l'état d'évolution des galaxies. Notre Galaxie, tout comme d'autres galaxies bien connues de l'Univers local, fournissent diverses références observationnelles pour calibrer les propriétés de la poussière pour une métallicité solaire. Cependant, pour les galaxies à grand décalage spectral, les propriétés de la poussière sont encore peu connues et l'évolution de ces propriétés avec différents paramètres galactiques comme la métallicité, l'activité de formation d'étoiles, la morphologie, etc. n'est pas claire. Avec leur faible abondance métallique et leur formation d'étoiles soutenue, les galaxies naines de l'Univers local sont des laboratoires idéaux pour l'étude de la formation stellaire et de sa rétroaction sur le MIS dans des conditions qui pourraient être représentatives des différents stades d'évolutions présents dans les environnements de l'Univers primordial.

Cependant, à cause de leur faible luminosité, et du manque d’une couverture spectrale complète des longueurs d’onde de l’infrarouge moyen (MIR) au domaine submillimétrique (submm), seule une poignée de galaxies naines ont été étudiées jusque là, et de grandes incertitudes demeurent sur les propriétés de leur poussière, même sur la propriété fondamentale qu’est la masse de poussière. Un excès d’émission dans le submm a aussi été observé dans plusieurs galaxies naines et des galaxies spirales à faible métallicité, que les modèles actuels ne peuvent expliquer. Avec la nouvelle gamme de longueurs d’onde couverte par *Herschel* dans le domaine de l’infrarouge lointain (FIR), et grâce à sa sensibilité sans précédent, nous sommes à présent en mesure d’étudier les propriétés détaillées des poussières de manière plus précise, et de sonder la poussière dans des systèmes ayant une métallicité extrêmement faible ($\sim 1/40 Z_{\odot}$).

Ma recherche se concentre sur les questions suivantes :

- Comment les propriétés de la poussière dans les galaxies (comme la masse, la température, la luminosité, etc.) varient avec la métallicité? Le choix du modèle pour décrire l’émission de la poussière impacte-t-il les propriétés globales des poussières en résultant? Si oui, comment?
- Dans quels environnements apparaît principalement l’excès submm?
- Comment les proportions de métaux dans le gaz et dans la poussière sont-elles reliées entre elles? Quelle est l’évolution du rapport en masse de gaz-sur-poussière (G/D) en fonction de la métallicité?

Dans ce travail, je mène une étude des propriétés de la poussière dans les galaxies naines, tout en comparant avec des environnements de métallicité plus élevée pour étudier l’impact de la métallicité sur les propriétés de la poussière. La nouveauté de ce travail réside dans le fait que les galaxies naines sont traitées ici de manière systématique, nous permettant de dériver et de quantifier les propriétés générales qui sont représentatives de ces systèmes. Cette étude est conduite sur toute la gamme de longueurs d’onde IR à submm, et utilise des nouvelles observations du télescope spatial *Herschel* en FIR/submm, ainsi que des données des télescopes *Spitzer*, *WISE*, *IRAS*, et du relevé 2MASS. Nous complétons cet échantillon de données par des observations à plus grande longueurs d’onde submm des installations au sol comme *APEX* et le *JCMT* pour étudier la présence et les caractéristiques de l’excès submm dans mon échantillon de galaxies. J’ai aussi collecté des données HI et CO pour avoir accès aux propriétés du gaz dans les galaxies et ainsi étudier l’évolution du G/D avec la métallicité.

Le manuscrit est composé de trois parties. La première partie est dédiée à une description générale du MIS des galaxies (Chapitre 1), puis des systèmes de faible métallicité et de leurs particularités (Chapitre 2). Dans ces deux premiers chapitres, nous présentons également les principales motivations pour ce travail. La seconde partie est dédiée à l’étude de la composante froide de la poussière révélée par *Herschel* dans les environnements de faible métallicité. Le télescope spatial *Herschel*, ainsi que les deux échantillons de galaxies considérés pour cette étude (un échantillon de galaxies naines, et un échantillon de galaxies plus riches en métaux) sont présentés dans le Chapitre 3. Le Chapitre 4 présente les nouvelles données *Herschel* obtenues pour nos objets, données que nous interprétons à l’aide d’un modèle de corps noir modifié dans un premier temps (Chapitre 5). La troisième partie de mon travail (Chapitre 6 à 9) élargit notre étude de la poussière dans ces systèmes de faible métallicité en s’intéressant cette fois à la totalité de la composante poussière sur toute la gamme de longueurs d’onde IR à submm. Les données sont récoltées et présentées dans le Chapitre 6. Les SEDs sont modélisées avec un modèle semi-empirique de poussière présenté dans le Chapitre 7. Les

résultats sont ensuite analysés et discutés dans le Chapitre 8. Nous nous intéressons plus particulièrement à la variation des propriétés de la poussière avec la métallicité et nous nous attaquons à la question de l’excès submm dans ce chapitre. Le dernier chapitre de cette thèse incorpore le gaz dans notre vision poussiéreuse des galaxies et présente l’étude des variations du G/D des galaxies avec la métallicité. Les résultats sont discutés et interprétés à l’aide de trois modèles d’évolution chimique différents.

Les données, depuis l’infrarouge proche jusqu’au domaine submillimétrique

Pour cette étude nous considérons deux échantillons de galaxies : le Dwarf Galaxy Survey (DGS) et le Key Insights on Nearby Galaxies : a Far-Infrared Survey with *Herschel* (KINGFISH). Le DGS est l’un des trois programmes de temps garanti sur *Herschel* du consortium Galaxies Local de l’instrument SPIRE. Le DGS a pour but l’étude de la poussière et du gaz dans les MIS de faible métallicité avec *Herschel*. Il comprend 48 cibles en photométrie. Les galaxies du DGS couvrent une large gamme de valeurs pour différents paramètres tels que la métallicité, le taux de formation d’étoiles, les masses d’étoiles et de gaz. Parmi ces 48 objets se trouvent notamment des galaxies comptant parmi les galaxies les plus déficientes en métaux de l’Univers local (IZw18, 1/40 Z_{\odot}). L’échantillon KINGFISH contient 61 galaxies réparties dans les différents types morphologiques (galaxies spirales, elliptiques et irrégulières) globalement plus riches en métaux que dans le DGS. Nous avons donc un total de 109 galaxies pour notre étude.

Les deux échantillons ont été observés dans les six bandes *Herschel* en photométrie. *Herschel* contient en effet deux photomètres, PACS (Photodetector Array Camera and Spectrometer) et SPIRE (Spectral and Photometric Imaging REceiver), observant à 70 μm , 100 μm , 160 μm (pour PACS) et 250 μm , 350 μm et 500 μm (pour SPIRE).

Nous nous sommes chargés de la réduction de données et de l’extraction des flux pour l’échantillon DGS uniquement, étant donné que cette étape avait déjà été faite dans la littérature pour l’échantillon KINGFISH. Les données SPIRE ont été réduites avec l’algorithme classique fourni par HIPE (the *Herschel* Interactive Processing Environment). Pour la réduction des données PACS, nous avons testé plusieurs méthodes de réduction de données : la méthode “classique” de PHOTPROJECT, la méthode MADMAP et la méthode SCANAMORPHOS. Nous avons montré que la méthode PHOTPROJECT était adaptée pour les sources ponctuelles et non pour les sources étendues. En effet, PHOTPROJECT a tendance à supprimer les structures étendues à cause d’une étape de filtrage passe-haut trop sélective. Pour les sources étendues, la méthode SCANAMORPHOS est préférée car elle ne suppose aucun modèle pour le bruit de fond, contrairement à MADMAP, et utilise plutôt la redondance des observations (i.e., le fait qu’une partie du ciel a été observée plus d’une fois, par plus d’un bolomètre).

Nous avons effectué de la photométrie d’ouverture pour obtenir les densités de flux PACS, tout en tenant compte du fait que la fonction d’étalement du point (ou PSF) a été mesurée pour cet instrument jusqu’à 1000". La photométrie pour SPIRE se fait directement au niveau 1 de la réduction de données pour les sources ponctuelles pour reproduire la méthode utilisée pour la calibration. Pour les sources étendues, nous avons effectué une photométrie d’ouverture sur les cartes finales.

Pour construire notre SED sur toute la gamme de longueurs d’onde depuis l’infrarouge

proche (NIR) jusqu'au submm, nous avons également récolté des données auxiliaires pour nos deux échantillons de galaxies. Les données 2MASS à $1.25\ \mu\text{m}$, $1.65\ \mu\text{m}$ et $2.20\ \mu\text{m}$ proviennent d'un relevé complet du ciel dans le NIR. Ces trois bandes donnent un accès direct à l'émission stellaire des plus vieilles populations stellaires, dont l'émission vient contaminer le signal en NIR. *Spitzer* a observé les 48 cibles du DGS avec les deux photomètres, IRAC (InfraRed Array Camera) et MIPS (Multiband Imaging Photometer for *Spitzer*), ainsi qu'avec le spectromètre IRS (InfraRed Spectrograph). IRAC observe à $3.6\ \mu\text{m}$, $4.5\ \mu\text{m}$, $5.8\ \mu\text{m}$ et $8.0\ \mu\text{m}$. MIPS observe à $24\ \mu\text{m}$, $70\ \mu\text{m}$ et $160\ \mu\text{m}$. Les observations IRS couvrent la gamme $5\ \mu\text{m}$ à $35\ \mu\text{m}$ en infrarouge moyen (MIR). Les données IRAC et MIPS pour le DGS consistent en une combinaison de données d'archive et du programme du cycle 5 : Dust Evolution in Low-Metallicity Environments. Les données MIPS ont été récemment réduites pour le DGS et sont disponible dans la littérature. Nous nous sommes chargés de la photométrie pour IRAC et du traitement des données IRS. Les données *Spitzer* permettent de contraindre la partie MIR de la SED et d'accéder, par exemple, aux caractéristiques spectrales des hydrocarbures polycycliques aromatiques (PAH, de grosses molécules présentes dans le MIS), ou encore à l'émission stellaire des vieilles populations d'étoiles. De plus, MIPS a deux bandes en commun avec PACS, ce qui nous a permis de les comparer et d'attester de la validité de nos résultats. Les spectres IRS sont principalement utilisés pour contraindre la forme du continu MIR, mais couvrent également les bandes des PAHs, ainsi que de nombreuses raies ioniques, particulièrement brillantes dans les galaxies naines. *IRAS* a observé le ciel en MIR et FIR à $12\ \mu\text{m}$, $25\ \mu\text{m}$, $60\ \mu\text{m}$ et $100\ \mu\text{m}$. Malheureusement, la sensibilité d'*IRAS* ne permet pas d'obtenir de données pour environ la moitié des sources du DGS. Les observations à $12\ \mu\text{m}$ notamment permettent d'obtenir une contrainte supplémentaire pour la modélisation des SEDs globales du DGS. Fort heureusement, la plupart des galaxies du DGS ont aussi été observées avec *WISE*, à $3.4\ \mu\text{m}$, $4.6\ \mu\text{m}$, $12\ \mu\text{m}$ et $22\ \mu\text{m}$. Les données à $12\ \mu\text{m}$ et $22\ \mu\text{m}$, seront très utiles dans le cas où ni *IRAS*/ 12 et $25\ \mu\text{m}$, ni *Spitzer*/ $24\ \mu\text{m}$, ne sont disponibles. Des observations en submm depuis des télescopes au sol sont cruciales pour notre étude sur l'excès submm. En effet, cet excès apparait habituellement vers $450\text{-}500\ \mu\text{m}$, rendant déterminantes les observations à plus grandes longueurs d'onde. Environ 30% du DGS a déjà été observé dans ces longueurs d'onde, avec soit LABOCA sur *APEX* à $870\ \mu\text{m}$, soit SCUBA sur le *JCMT* à $850\ \mu\text{m}$, soit MAMBO sur le télescope 30 m de l'IRAM à $1.2\ \text{mm}$. De nouvelles observations ont également été obtenues après l'acceptation de plusieurs demandes de temps d'observation sur LABOCA, pour trois des galaxies du DGS. A ces longueurs d'onde, une contamination par l'émission radio de la galaxie, ainsi que par plusieurs raies du gaz moléculaire, peut avoir lieu. Nous avons donc également collecté des données radio et de gaz moléculaire pour soustraire cette contamination non poussiéreuse de nos données.

Pour étudier les propriétés du gaz et notamment du G/D, nous avons aussi collecté les données HI et CO pour notre échantillon en s'appuyant sur les données existant dans la littérature.

L'échantillon KINGFISH est tiré de l'échantillon SINGS et possède donc déjà une large gamme de données auxiliaires compilées dans la littérature pour les longueurs d'onde détaillées ici.

Un premier modèle : le corps noir modifié

Dans un premier temps, nous considérons un modèle simple de corps noir modifié pour interpréter les données *Herschel*. En effet, les données *Herschel* couvrent le domaine de longueur d'onde FIR, où l'essentiel de la luminosité totale IR est émise et où la plus grande partie de la masse de poussière peut être tracée. En effet les grains de poussière froide sont aussi les plus gros, et donc les plus massifs. Ces grains peuvent être considérés en équilibre thermique avec le champ de radiation interstellaire. Si nous supposons que tous ces grains ont la même température d'équilibre (i.e., la même taille), alors leur émission peut être représentée par un corps noir modifié. Le modèle de corps noir est en effet modifié par une loi d'opacité dépendant de la longueur d'onde suivant une loi de puissance, dont l'indice spectral est appelé indice d'émissivité. Grâce à ce modèle de corps noir modifié, nous avons accès à la température des grains, l'indice d'émissivité, la masse de poussière et la luminosité totale en FIR. A $70 \mu\text{m}$, il peut y avoir une contamination possible par de la poussière qui n'est pas en équilibre thermique avec son environnement et donc dont l'émission ne peut être représentée par un corps noir modifié. Nous appliquons donc ce modèle de corps noir modifié uniquement aux données de $100 \mu\text{m}$ à $500 \mu\text{m}$, le point à $70 \mu\text{m}$ représentant une limite supérieure à ne pas être franchie par le modèle. Les erreurs sont estimées de manière rigoureuse en perturbant les densités de flux dans la barre d'erreur correspondante, et en réalisant 300 itérations Monte Carlo de notre procédure d'ajustement. Dans notre traitement des erreurs, nous distinguons pour chaque longueur d'onde la partie non systématique de l'erreur et la partie systématique de l'erreur qui peut être corrélée entre différentes bandes (comme par exemple les erreurs de calibration pour chaque instrument). Après 300 itérations, nous obtenons une distribution pour chacun des paramètres du modèle, ce qui nous permet d'estimer de manière robuste les erreurs sur les paramètres du modèle. Ce modèle, populaire dans la littérature, présente quand même certaines limitations, dues à l'approximation faite sur une température unique pour les grains de poussière. Cependant, dans une galaxie, les grains de poussière sont vraisemblablement de tailles, et donc de températures, différentes. Un modèle de poussière plus réaliste est donc envisagé pour la suite de notre étude.

Une modélisation réaliste des poussières

La modélisation de l'émission de la poussière d'une galaxie est un procédé très complexe. Plusieurs régions d'une galaxie comme les régions de formation d'étoiles, les nuages moléculaires, le MIS diffus, etc. contribuent chacune à leur manière à la SED de la poussière à chaque longueur d'onde, et toutes ces contributions peuvent être mélangées dans le faisceau du télescope. Dans chacune de ces régions, les conditions d'illumination et la composition de la poussière peuvent varier, ainsi qu'entre les différentes régions. Cependant, le manque de contraintes observationnelles si détaillées et de résolution spatiale suffisante ne nous permettent pas d'accéder à ce niveau de détail dans les galaxies aux plus grandes longueurs d'onde, sauf peut-être pour les galaxies les plus proches (comme les Nuages de Magellan ou M31). Nous considérons donc ici l'émission totale intégrée des galaxies.

Dans une région donnée, les conditions physiques de la poussière sont directement liées aux conditions d'illumination. Par exemple, la poussière dans les nuages moléculaires, dans lesquels peu de radiation stellaire peut pénétrer, sera plus froide que la poussière dans le MIS diffus. Dans notre modèle, nous supposons que chaque région de la galaxie est soumise à des conditions d'illumination uniformes et que la composition de la poussière et ses propriétés

sont les mêmes d'un bout à l'autre de la galaxie. Nous tenons compte des différentes régions existant dans une galaxie en combinant des régions illuminées par différentes intensités de champ de rayonnement interstellaire. Notre modèle présente donc deux étapes. Premièrement, nous modélisons la SED de la poussière d'un élément de masse du MIS, caractérisée par une intensité uniforme du champ de radiation et contrôlée par les propriétés microscopiques des grains. La seconde étape consiste à combiner plusieurs éléments de masse pour tenir compte de la grande gamme de conditions d'illumination dans la galaxie.

Un modèle de poussière est défini par plusieurs variétés de poussière. Chaque variété est ensuite caractérisée par une distribution de taille et des propriétés optiques. Nous adoptons la composition de poussière standard de la Galaxie, avec ses trois variétés de grains : les PAHs, les grains de silicate, et les grains de carbone, sous forme de graphite. La distribution de taille de cette composition pour la poussière a été déterminée précédemment dans la littérature en reproduisant les contraintes fournies par la courbe d'extinction, la courbe d'émission et les abondances interstellaires du milieu diffus Galactique. Les propriétés optiques de chaque variété sont calculées à partir de la théorie de Mie. Il est important de noter que, si les propriétés optiques des grains sont des propriétés intrinsèques, la distribution de taille dépend de certaines hypothèses (métallicité solaire et champ de radiation Galactique ici). Dans l'absolu, cette distribution de taille n'est pas applicable directement à d'autres galaxies où la métallicité et le champ de radiation peuvent varier. Cependant, une fois encore, le manque de contraintes observationnelles dans les autres galaxies ne nous permettent pas de recalculer la distribution de taille à chaque fois, et nous *approximons* donc la distribution de taille dans notre galaxie par la distribution de taille valide dans le MIS diffus Galactique.

Le modèle comprend 7 paramètres libres :

- la masse de poussière,
- l'intensité minimum du champ de rayonnement interstellaire,
- la différence entre le maximum et le minimum d'intensité pour le champ de rayonnement interstellaire,
- l'indice de la loi de puissance servant à décrire la distribution des intensités du champ de rayonnement interstellaire,
- la fraction de masse des PAHs, normalisée à la valeur Galactique (quand ce paramètre vaut 0.5, alors la fraction de masse des PAHs est la moitié de celle de la Voie Lactée dans la galaxie modélisée),
- la fraction de PAHs ionisés par rapport à la totalité des PAHs (quand ce paramètre vaut 0.5 alors la moitié des PAHs sont ionisés),
- la fraction de masse des très petits grains, (i.e., des grains de rayons ≤ 10 nm), normalisée à la valeur Galactique (quand ce paramètre vaut 0.5, cela signifie que la fraction de masse des très petits grains dans la galaxie modélisée est la moitié de celle de la Galaxie). Ce paramètre permet d'avoir un degré de liberté en plus pour la distribution de taille.

Nous avons également fixé la fraction de masse des grains silicatés à la valeur Galactique. Pour certaines galaxies, la forme du continu en MIR dessinée par le spectre IRS ne peut être bien ajustée par notre modèle. Dans ces cas-là, nous ajoutons un corps noir modifié supplémentaire dans le domaine MIR, avec un indice d'émissivité de 2.0 et une température variant entre 80 et 300 K. Cela peut être interprété physiquement comme la contribution d'une région HII très chaude à l'émission totale de la galaxie. Les galaxies naines étant relativement petites en taille, et présentant peu d'atténuation par la poussière, l'émission

d'énergétiques régions HII peut en effet impacter l'émission de la galaxie tout entière. Les erreurs sont traitées de la même façon que pour le modèle de corps noir modifié présenté à la section précédente.

Résultats

Grâce à ces deux modèles nous avons à présent une vue à la fois globale et précise des propriétés des poussières dans les galaxies. Nous développons ici trois grands axes de résultats.

Etude des propriétés de la poussière

Nous montrons dans notre étude qu'une bonne couverture en longueur d'onde du pic, et de la pente Rayleigh-Jeans de la SED de la poussière, comme il est maintenant possible d'avoir avec *Herschel*, est cruciale si l'on veut déterminer avec précision les propriétés de la poussière comme la masse ou la luminosité totale en IR (TIR). Une description réaliste de la poussière est aussi déterminante et nécessaire pour estimer correctement la masse de poussière. En effet, nous trouvons que les masses de poussière estimées avec un corps noir modifié sont systématiquement sous-estimées d'un facteur ~ 1.8 par rapport aux masses de poussière estimées avec un modèle complet de poussière. Cela peut avoir d'importantes conséquences pour des études utilisant un corps noir modifié pour estimer la masse de poussière, et qui vont même plus loin en estimant un G/D à partir de cette masse de poussière sous-estimée.

En combinant des couleurs FIR et submm avec les résultats de la modélisation faite avec les deux modèles de poussière, nous montrons que la SED de la poussière dans les galaxies naines de faible métallicité peut avoir une forme particulière : elles ont souvent un pic plus étalé, et décalé vers les longueurs d'onde plus petites, comparées aux SEDs des galaxies plus riches en métaux. Cela reflète une température d'équilibre moyenne pour les grains plus élevée ($T_d \sim 30$ K), et une distribution de température pour les grains plus grande ($\Delta T_d \sim 110$ K) dans les galaxies de métallicité faible par rapport aux environnements plus riches en métaux ($T_d \sim 20$ K et $\Delta T_d \sim 40$ K). Cette poussière globalement plus chaude est due au champ de rayonnement interstellaire plus dur qui interagit avec le MIS poreux des galaxies naines. Cet effet avait déjà été observé sur une poignée de galaxies naines seulement, et est maintenant confirmé sur un échantillon plus grand, et quantifié. Il en découle directement que les galaxies naines de faible métallicité émettent plus par unité de masse sur tout le domaine IR de longueurs d'onde (environ 7 fois plus) que les environnements plus riches en métaux. Ceci est directement lié au champ de radiation plus dur observé dans les galaxies de faible métallicité et aux abondances de poussière plus faibles.

Nous explorons également le rapport en masse poussière-sur-étoiles et les taux de formation d'étoile spécifiques, et constatons que la métallicité n'a un impact que sur la seconde de ces deux quantités : le rapport en masse poussière-sur-étoiles reste plus ou moins constant sur la gamme de métallicité que nous étudions, mais nous trouvons que les galaxies naines sont plus efficaces pour former leurs étoiles que leurs contreparties plus riches en métaux.

Etude de l'excès submillimétrique

Nous examinons la présence d'un excès d'émission dans les longueurs d'onde submm dans notre échantillon par rapport au modèle complet de poussière, pour les 78 galaxies détectées à $500 \mu\text{m}$. Nous trouvons un excès à $500 \mu\text{m}$ pour environ 35% des cas, et pas seulement

dans les galaxies les plus pauvres en métaux. Quand nous prenons en compte les longueurs d'onde submm plus grandes (850, 870 ou 1200 μm) nous trouvons que la moitié environ de l'échantillon présente un excès en submm. Cela démontre que cet excès submm n'est pas exceptionnel et pas seulement limité aux environnements pauvres en métaux. Nous examinons également la présence d'un excès submm par rapport à un modèle de corps noir modifié avec un indice d'émissivité fixé à 2.0, et trouvons des résultats cohérents comparés aux résultats trouvés pour un excès par rapport à un modèle complet de poussière. Ceci nous permet de définir une méthode pour détecter les galaxies qui ont une forte probabilité de présenter un excès submm par rapport à un modèle complet de poussière, en utilisant seulement des données *Herschel* et un modèle simple de corps noir modifié. Nous étudions également l'influence de la métallicité sur cet excès. Nous montrons que l'excès submm apparaît préférentiellement dans les galaxies de faible métallicité, mais que l'intensité de l'excès ne dépend pas de la métallicité. A des métallicités faibles ($12+\log(\text{O}/\text{H}) \leq 8.0$), l'intensité moyenne du champ de radiation, reliée à la température moyenne de la poussière, permet de discriminer entre les galaxies avec ou sans excès : les galaxies avec une température moyenne basse étant donnée leur métallicité (~ 20 K) n'ont pas d'excès. Les couleurs en FIR/submm sont aussi un bon outil empirique pour détecter ou prédire l'apparition de l'excès. Les galaxies qui ont un excès à 500 μm ont un rapport $\frac{F_{160}/F_{250}}{F_{250}/F_{500}}$ élevé ($\gtrsim 0.37$). Les galaxies avec $\frac{F_{160}/F_{250}}{F_{250}/F_{500}} \gtrsim 0.37$ et sans excès, sont soit des galaxies avec une température faible pour leur métallicité, soit présentent un excès à plus grande longueur d'onde submm. A ces plus grandes longueurs d'onde submm, nous trouvons que la pente submm de la SED détermine si un excès est présent ou pas : les galaxies avec un rapport $F_{500}/F_{850(870)} \lesssim 5.5$ ont un excès à des longueurs d'onde ≥ 850 μm . Nous avons donc mis en lumière dans cette étude plusieurs critères à la fois observationnels et de modélisation pour identifier des galaxies présentant un excès submm. Ceci fournit des outils utiles pour déterminer si une galaxie peut présenter un excès dans le cas où peu de données sont disponibles, et où l'on ne peut recourir à un modèle complet de poussière.

De plus, nous modélisons la SED IR à submm des galaxies avec excès avec un autre modèle de poussière, contenant une composition alternative de poussière : les grains de graphite sont remplacés par des grains de carbone amorphes, plus émissifs. Nous sommes alors en mesure d'expliquer l'excès dans 12 galaxies sur les 37 présentant un excès avec le modèle utilisant des grains de graphite. Ces galaxies sont principalement des galaxies de métallicité modérée et avaient les excès les moins intenses par rapport au modèle utilisant les graphites. Nous pensons donc que l'excès submm dans ces galaxies est simplement dû au fait qu'une composition Galactique de grains n'est en fait pas appropriée pour modéliser l'émission de la poussière dans ces galaxies. Cela confirme des résultats précédents, obtenus dans la littérature, montrant que le modèle utilisant des carbones amorphes était aussi plus approprié pour le Grand Nuage de Magellan, de métallicité modérée. Néanmoins, un excès est toujours présent dans les longueurs d'onde submm pour 25 galaxies de notre échantillon, même en étant modélisées avec le modèle contenant les grains de carbone amorphes. C'est un signe qu'un autre mécanisme est nécessaire pour expliquer de manière satisfaisante l'émission submm de ces galaxies.

Etude de l'évolution du rapport en masse gaz-sur-poussière en fonction de la métallicité

Nous étudions également la relation entre le G/D et la métallicité, en bénéficiant de notre estimation plus précise de la masse de poussière dans nos galaxies, par rapport aux études

précédentes qui utilisaient des masses de poussière estimées sans contraintes submm et/ou avec des modèles de corps noir modifié. Nous étudions également ce paramètre sur une gamme sans précédent de métallicité (2 dex) avec une fraction conséquente de notre échantillon avec une métallicité plus petite que $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 8.0$ (30%), ce qui nous permet de mieux contraindre le comportement du G/D à de faibles métallicités. Nous modélisons la tendance observée entre le G/D et la métallicité en utilisant une loi de puissance simple (avec une pente fixée à -1 ou libre) et une loi de puissance brisée. Nous trouvons que le G/D ne suit pas la tendance de “référence” avec la métallicité (une loi de puissance simple avec une pente de -1) sur toute notre gamme de métallicité. Notre tendance observée est plus pentue pour des métallicités en deçà de 8.0. Une large dispersion est observée dans les valeurs du G/D également pour une métallicité donnée : dans des intervalles de 0.1 dex, la dispersion autour de la valeur moyenne est de 0.37 dex en moyenne. La loi de puissance brisée reproduit mieux en moyenne les G/D observés, par rapport aux deux autres lois de puissance (pente de -1 ou libre), et fournit des estimations du G/D qui sont précises à un facteur 1.6. Même si plus de données à des métallicités extrêmement faibles (≤ 7.5) est nécessaire pour mieux contraindre les G/D observés, cette loi de puissance brisée est la meilleure estimation empirique du G/D pour les galaxies locales disponible pour l’instant. Cette nouvelle estimation empirique peut être utilisées pour des galaxies locales pour estimer un G/D en se basant uniquement sur la métallicité (qui aura dû être estimée avec la même méthode que celle que nous utilisons dans ces travaux). Des prédictions de trois différents modèles d’évolution chimique des galaxies sont également comparées à nos valeurs observées pour le G/D : d’abord un modèle simple ; puis un modèle incluant des processus de croissance de grains dans le MIS comme source de production de la masse de poussière, ainsi qu’une formation d’étoile continue ; et enfin un troisième modèle prenant en compte une formation d’étoile épisodique, plus spécifique aux galaxies naines. Le bon accord entre les observations du G/D et sa dispersion avec les valeurs prédites par les modèles, nous permettent de déduire que la dispersion dans cette relation est intrinsèque aux propriétés des galaxies, et reflètent les différentes histoires de formation stellaire, efficacités de destruction de la poussière, distributions de taille des grains et composition chimique à travers notre échantillon.

Perspectives de ce travail

Ce travail ouvre un certain nombre de perspectives que j’aimerais explorer par la suite.

Zoom dans le MIS

Une récente étude du Grand Nuage de Magellan à diverses résolutions spatiales a montré que le manque de résolution spatiale pouvait conduire à une sous-estimation de la masse de poussière d’environ 50%. La modélisation de galaxies distantes non résolues avec les modèles de poussière actuels peut donc donner de grandes incertitudes sur les propriétés de la poussière due au mélange des différentes phases du MIS dans le faisceau du télescope : malgré un faible facteur de remplissage, la phase de poussière chaude autour des régions de formation d’étoiles, peut dominer l’émission totale de la galaxie. Pour être en mesure d’interpréter correctement les observations, de nouvelles études doivent zoomer dans les structures du MIS pour établir quels sont les processus responsables de la physique de ces différentes régions. La richesse des nouvelles données *Herschel* disponibles sur des galaxies locales très bien résolues, couplée aux données déjà existantes de *Spitzer* et des instruments au sol, nous place dans une position

idéale pour étudier l'effet de la variation des échelles spatiales sur l'interprétation des SEDs d'une grande variété de régions, depuis les régions HII très chaudes autour d'amas de jeunes étoiles jusqu'aux cœurs denses des nuages moléculaires. Il est maintenant possible de lier directement les variations observées dans la SED de la poussière et des propriétés du gaz au phénomène physique se passant dans la galaxie (comme le chauffage de la poussière par la population d'étoiles vieilles). L'étude d'une variété d'environnements pour la poussière dans la même galaxie (par exemple, les Nuages de Magellan, M31 ou M51, 4 galaxies extensivement étudiées avec *Herschel*) permettrait de dévoiler les conditions physiques de la poussière dans ces régions (intensité du champ de rayonnement interstellaire, température et distribution de taille des grains, abondances, ...). Quelques galaxies naines du DGS présentent aussi des détails résolus aux longueurs d'onde d'*Herschel* (région de formation d'étoiles, grands amas d'étoiles jeunes encore enfouies dans leur cocon de poussière, ...). Avec ces quelques cas de référence, nous pourrions étudier comment la métallicité affecte l'impact de la résolution spatiale sur les propriétés de la poussière (comme la masse de poussière), permettant de construire un cadre d'interprétation riche pour les galaxies non résolues de l'Univers lointain. Ces études initiales seront sûrement des cas intéressants à observer avec ALMA, par exemple, pour obtenir la meilleure vue possible des structures du MIS et ainsi déterminer comment cela impacte-t-il l'estimation de la masse de poussière dans les galaxies.

A propos de l'excès submm

Notre étude a maintenant identifié de manière systématique les galaxies présentant un excès submm. Une suite évidente à travail pourrait être d'étendre les observations *Herschel* à de plus grandes longueurs d'onde avec davantage de campagnes d'observation sur APEX/LABOCA ou IRAM/GISMO (qui observe à 2 mm), ou encore utiliser les catalogues de *Planck* disponibles ; dans les cas où un excès à 500 μm a été détecté mais où aucune donnée à plus grande longueur d'onde n'existe pour l'instant. La méthode que j'ai définie pour trouver l'excès dans mon échantillon de galaxies pourrait être appliquée à d'autres échantillons *Herschel*, comme par exemple le *Herschel* Reference Survey ou le *Herschel* Virgo Cluster Survey, pour identifier les sources avec excès de manière systématique dans ces échantillons. Cela permettrait d'enrichir la première étude que nous avons faite sur l'excès submm et voir si nos résultats sont confirmés sur un nombre encore plus grand de galaxies.

Mieux contraindre le G/D aux métallicités extrêmement faibles

A présent, le G/D est bien contraint aux métallicités faibles. Par contre pour des métallicités extrêmement faibles ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 7.5$) plus d'observations sont nécessaires pour renforcer nos résultats. Cette étude était basée sur un échantillon de galaxies naines plutôt riches en gaz. Pour poursuivre ce projet, nous pourrions chercher des galaxies naines de métallicité extrêmement faible, ou pauvre en gaz dans les autres échantillons *Herschel* pour voir si leur G/D se compare ou non avec les tendances dérivées des modèles d'évolution chimique. Les masses de poussière et de gaz dans ce régime à très faible métallicité seront très importantes pour les modèles d'évolution chimique qui sont au cœur de la compréhension des processus d'évolution des galaxies.