

Alexandre Beelen, Curriculum Vitae

Lieu de naissance : Salé, Maroc
Date de naissance : 23 Septembre 1977
Nationalité : Français
Adresse professionnelle : Institut d'Astrophysique Spatiale
bât 121 - Université Paris Sud, 91405 Orsay Cedex, France
Tél. : +33 (0)1 69 85 87 17
E-mail: alexandre.beelen@ias.u-psud.fr

Activité actuelle

- *Post-doc* en astronomie **11/2006 – présent**
Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay, France
G. Lagache (IAS, Orsay) guilaine.lagache@ias.u-psud.fr

Formation

- *Post-doc* en astronomie **2004 – 2006**
Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, Allemagne
F. Bertoldi (Uni-Bonn, Bonn) bertoldi@astro.uni-bonn.de
- *Thèse* en astronomie **2001 – 2004**
Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay, France
'*Gaz et poussière dans les quasars à grand décalage spectral*'
Directeur : P. Cox (IAS, Orsay) cox@iram.fr
- *DEA* Dynamique des systèmes gravitationnels **2000 – 2001**
Observatoire de Paris, Paris, France
Cours d'astrophysique générale & spécialisation en physique des galaxies et cosmologie.
Responsable : Ana Gomez (Obspm, Paris) ana.gomez@obspm.fr
- *DEA* Physique théorique (ajourné) **1999 – 2000**
École Normale Supérieure de Lyon, Lyon, France
Cours de physique théorique & spécialisation en physique des particules.
Responsable : François Delduc (ENS, Lyon)
- *Licence-Maitrise* de physique fondamentale **1997 – 1999**
Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, Versailles, France
- *Diplôme d'Étude Universitaire Général* en physique **1995 – 1997**
Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, Versailles, France
- *Baccalauréat scientifique* spécialité physique **1995**
Lycée Hoche, Versailles, France

Expériences professionnelles

- Rapporteur pour MNRAS (2006 – 1 article) et A&A (2005 – 2 articles)
- **LaBoCa/APEX** (3 sessions avec mise en service; 2006 – 2008)
- **ASZCa/APEX** mise en service (1 session; 2006)
- **SHARC-II/CSO** observations & réduction de données (5 sessions; 2002 – 2008)
- **VLA** observations & réduction de données (1 projet; 2003)
- **30-m** observation en *pool* (2001 – 2006)
expériences sur **MAMBO**, observations hétérodynes & réduction de données.
- **PdB** observations & réduction de données (8 projets; 2001 – 2008)
- Réduction de données optiques (soustraction d'images) & théorie sur les courbes de lumière de *microlensing*, au sein de l'équipe EROS (CEA, Saclay, France) 4 mois – 2000
- Étude des perturbations de surface d'un miroir liquide incliné, avec Ermanno F. Borra (Laval University , Quebec, Canada) 3 mois – 1999

Enseignement

- Encadrement lors de travaux pratiques, école D-SIGALE, IAS (1 demi-journée, 2008)
- Encadrement du cours sur les bolomètres, école d'été de l'IRAM (1 semaine; 2005)
- Co-Encadrement des TP de C++ des étudiants de DEA (20h eq TD; 2003)
- Monitorat en physique, TD et TP en DEUG Science de la Vie première année, licence science de la Vie et licence de physique fondamentale. ondes, mécanique, dynamique, mécanique des fluides, optique. (64h eq TD/an; 2001–2004)
- Tutorat en physique de DEUG Science de la vie première année. Ondes, mécanique, mécanique des fluides (16h eq TD; 1998)

Animation scientifique

- Contributions aux réunions *show & tell*, Université de Bonn, 2005 – 2006
- Journée de formation à \LaTeX avec Eric Buchlin à l'IAS, 2004
- Présentations aux Journées thésards de l'IAS, 2001 – 2004
- Contributions aux réunions de la thématique cosmologie à l'IAS, 2001 – présent

Encadrement

- Co-encadrement de la thèse de Manuel Aravena, Université de Bonn, 2006 – 2008
- Co-encadrement d'un stage de DEA, 2003

Responsabilités

- Direction du développement du logiciel de traitement de données BoA, 2005 – 2006
- Site web de l'équipe galaxies & cosmologie, 2002 – 2004
- Développement Système de gestion d'observation en *pool* à l'IRAM, hiver 2001

Présentations et posters

- Présentation Martinique08 : *Formation Stellaire dans le Cluster de Francis*, 2008
- Séminaire du LERMA : *Observations avec LABoCa d'un protocluster à $z = 2.4$* , 2008
- Présentation Invitée SF2A : *Formation stellaire à grand- z* , 2007
- Poster SF2A : *APEX-SZ*, 2006
- Poster SF2A : *Atacama Pathfinder EXperiment*, 2005
- Présentation *SHARC-II data reduction workshop : High- z QSOs Observations*, 2004
- Présentation SF2A : *Gaz et poussière dans les quasars à grand décalage spectral*, 2004
- Séminaire CEA : *Gaz et poussière dans les quasars à grand décalage spectral*, 2004
- Poster *First-Stars : Dust and Gaz in the early Universe*, 2003
- Présentation EARA : *Starburst activity in the host galaxies of high redshift sources – The case of the $z=2.58$ QSO J1409+5628*, 2003
- Poster Saas-Fee : *Dust and CO in high redshift quasars*, 2002

Informatique

- *OS*: GNU/Linux, Unix, Ms Windows
- *Lang.* : Python, RSI IDL, F90, perl/csh, C/C++, XML, (D/X)HTML, Php/MySQL, L^AT_EX, F77

Langue

- Français; Anglais : courant; Allemand : bonne compréhension

Divers

- *Sports* : parapente, plongée sous-marine, parachutisme, roller, ski
- *Musique* : piano, niveau fin d'étude

Liste de publications

Articles à comité de lecture

- [1] C. J. Lonsdale, M. Polletta, A. Omont, D. Shupe, S. Berta, R. Zylka, B. Siana, D. Lutz, D. Farrah, H. E. Smith, G. Lagache, C. De Breuck, F. Owen, **A. Beelen**, D. Weedman, A. Franceschini, D. Clements, L. Tacconi, A. Afonso-Luis, I. Perez-Fournon, P. Cox, and F. Bertoldi. MAMBO 1.2mm observations of luminous starbursts at $z \sim 2$ in the SWIRE fields. *ArXiv e-prints*, October 2008.
- [2] K. E. K. Coppin, A. M. Swinbank, R. Neri, P. Cox, D. M. Alexander, I. Smail, M. J. Page, J. A. Stevens, K. K. Knudsen, R. J. Ivison, **A. Beelen**, F. Bertoldi, and A. Omont. Testing the evolutionary link between submillimetre galaxies and quasars: CO observations of QSOs at $z \sim 2$. *MNRAS*, 389:45–62, September 2008.
- [3] **A. Beelen**, A. Omont, N. Bavouzet, A. Kovács, G. Lagache, C. De Breuck, A. Weiss, K. M. Menten, J. W. Colbert, H. Dole, G. Siringo, and E. Kreysa. Submillimeter observations of the J2142-4423 Ly α protocluster at $z = 2.38$. *A&A*, 485:645–655, July 2008.
- [4] C. L. Carilli, F. Walter, R. Wang, A. Wootten, K. Menten, F. Bertoldi, E. Schinnerer, P. Cox, **A. Beelen**, and A. Omont. Studying the first galaxies with ALMA. *Ap&SS*, 313:307–311, January 2008.
- [5] C. J. Willott, P. Delorme, A. Omont, J. Bergeron, X. Delfosse, T. Forveille, L. Albert, C. Reylé, G. J. Hill, M. Gully-Santiago, P. Vinten, D. Crampton, J. B. Hutchings, D. Schade, L. Simard, M. Sawicki, **A. Beelen**, and P. Cox. Four Quasars above Redshift 6 Discovered by the Canada-France High- z Quasar Survey. *AJ*, 134:2435–2450, December 2007.
- [6] R. Wang, C. L. Carilli, **A. Beelen**, F. Bertoldi, X. Fan, F. Walter, K. M. Menten, A. Omont, P. Cox, M. A. Strauss, and L. Jiang. Millimeter and Radio Observations of $z \sim 6$ Quasars. *AJ*, 134:617–627, August 2007.
- [7] M. Dobbs, N. W. Halverson, P. A. R. Ade, K. Basu, **A. Beelen**, F. Bertoldi, C. Cohalan, H. M. Cho, R. Güsten, W. L. Holzapfel, Z. Kermish, R. Kneissl, A. Kovács, E. Kreysa, T. M. Lanting, A. T. Lee, M. Lueker, J. Mehl, K. M. Menten, D. Muders, M. Nord, T. Plagge, P. L. Richards, P. Schilke, D. Schwan, H. Spieler, A. Weiss, and M. White. APEX-SZ first light and instrument status. *New Astronomy Review*, 50:960–968, December 2006.
- [8] A. O. Petric, C. L. Carilli, F. Bertoldi, **A. Beelen**, P. Cox, and A. Omont. Radio and Millimeter Observations of $z \sim 2$ Luminous QSOs. *AJ*, 132:1307–1315, September 2006.
- [9] **A. Beelen**, P. Cox, D. J. Benford, C. D. Dowell, A. Kovács, F. Bertoldi, A. Omont, and C. L. Carilli. 350 μm Dust Emission from High-Redshift Quasars. *ApJ*, 642:694–701, May 2006.
- [10] R. Maiolino, P. Cox, P. Caselli, **A. Beelen**, F. Bertoldi, C. L. Carilli, M. J. Kaufman, K. M. Menten, T. Nagao, A. Omont, A. Weiß, C. M. Walmsley, and F. Walter. First

detection of [CII]158 μm at high redshift: vigorous star formation in the early universe. *A&A*, 440:L51–L54, September 2005.

- [11] C. L. Carilli, P. Solomon, P. Vanden Bout, F. Walter, **A. Beelen**, P. Cox, F. Bertoldi, K. M. Menten, K. G. Isaak, C. J. Chandler, and A. Omont. A Search for Dense Molecular Gas in High-Redshift Infrared-Luminous Galaxies. *ApJ*, 618:586–591, January 2005.
- [12] J. Pety, **A. Beelen**, P. Cox, D. Downes, A. Omont, F. Bertoldi, and C. L. Carilli. Atomic carbon in PSS 2322+1944, a quasar at redshift 4.12. *A&A*, 428:L21–L24, December 2004.
- [13] C. L. Carilli, F. Walter, F. Bertoldi, K. M. Menten, X. Fan, G. F. Lewis, M. A. Strauss, P. Cox, **A. Beelen**, A. Omont, and N. Mohan. Radio Continuum Imaging of Far-Infrared-Luminous QSOs at $z > 6$. *AJ*, 128:997–1001, September 2004.
- [14] **A. Beelen**, P. Cox, J. Pety, C. L. Carilli, F. Bertoldi, E. Momjian, A. Omont, P. Petitjean, and A. O. Petric. Starburst activity in the host galaxy of the $z = 2.58$ quasar J1409+5628. *A&A*, 423:441–447, August 2004.
- [15] F. Bertoldi, P. Cox, R. Neri, C. L. Carilli, F. Walter, A. Omont, **A. Beelen**, C. Henkel, X. Fan, M. A. Strauss, and K. M. Menten. High-excitation CO in a quasar host galaxy at $z = 6.42$. *A&A*, 409:L47–L50, October 2003.
- [16] F. Bertoldi, C. L. Carilli, P. Cox, X. Fan, M. A. Strauss, **A. Beelen**, A. Omont, and R. Zylka. Dust emission from the most distant quasars. *A&A*, 406:L55–L58, July 2003.
- [17] A. Omont, **A. Beelen**, F. Bertoldi, P. Cox, C. L. Carilli, R. S. Priddey, R. G. McMahon, and K. G. Isaak. A 1.2 mm MAMBO/IRAM-30 m study of dust emission from optically luminous $z \sim 2$ quasars. *A&A*, 398:857–865, February 2003.
- [18] C. L. Carilli, P. Cox, F. Bertoldi, K. M. Menten, A. Omont, S. G. Djorgovski, A. Petric, **A. Beelen**, K. G. Isaak, and R. G. McMahon. Imaging Low-Order CO Emission from the $z = 4.12$ Quasi-Stellar Object PSS J2322+1944. *ApJ*, 575:145–149, August 2002.
- [19] P. Cox, A. Omont, S. G. Djorgovski, F. Bertoldi, J. Pety, C. L. Carilli, K. G. Isaak, **A. Beelen**, R. G. McMahon, and S. Castro. CO and Dust in PSS 2322+1944 at a redshift of 4.12. *A&A*, 387:406–411, May 2002.

Actes de conférence

- [1] G. Siringo, E. Kreysa, A. Kovacs, F. Schuller, A. Weiß, W. Esch, H.-P. Gemünd, N. Jethava, G. Lundershausen, R. Güsten, K. M. Menten, **A. Beelen**, F. Bertoldi, J. W. Beeman, E. E. Haller, and A. Colin. The large APEX bolometer camera LABOCA. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 7020 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, August 2008.
- [2] A. O. Petric, C. L. Carilli, R. E. Mason, F. Bertoldi, **A. Beelen**, P. Cox, A. Omont, and D. Helfand. A Radio, Millimeter and IR Study of $z \approx 2$ Luminous QSOs. In L. C. Ho and J.-W. Wang, editors, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, volume 373 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 747–+, October 2007.

- [3] R. Maiolino, P. Cox, P. Caselli, **A. Beelen**, F. Bertoldi, M. J. Kaufman, T. Nagao, A. Omont, A. Weiss, and M. Walmsley. First detection of [CII]158 μ m at high redshift: vigorous star formation in the early universe. In D. C. Lis, G. A. Blake, and E. Herbst, editors, *IAU Symposium*, pages 157–+, August 2005.
- [4] P. Cox, **A. Beelen**, F. Bertoldi, A. Omont, C. L. Carilli, and F. Walter. Gas and dust in high redshift quasars. In A. Wilson, editor, *The Dusty and Molecular Universe: A Prelude to Herschel and ALMA*, pages 115–120, January 2005.
- [5] C. Carilli, F. Bertoldi, F. Walter, K. M. Menten, **A. Beelen**, P. Cox, and A. Omont. Molecular Gas in High Redshift QSOs. In R. Mújica and R. Maiolino, editors, *Multiwavelength AGN Surveys*, pages 115–+, January 2004.
- [6] P. Cox and **A. Beelen**. Dust and Molecular Gas in High-z Quasars. In S. Aalto, S. Huttemeister, and A. Pedlar, editors, *ASP Conf. Ser. 320: The Neutral ISM in Starburst Galaxies*, pages 333–+, 2004.
- [7] A. Omont, **A. Beelen**, F. Bertoldi, C. L. Carilli, and P. Cox. Redshifted Far-infrared/submm Dust Emission from High-z QSOs. In R. Mújica and R. Maiolino, editors, *Multiwavelength AGN Surveys*, pages 109–+, January 2004.
- [8] F. Bertoldi, C. L. Carilli, F. Walter, A. Omont, P. Cox, **A. Beelen**, and et al. Dust and Molecular Emission from High-redshift Quasars. *Astronomische Nachrichten Supplement*, 324:51–+, July 2003.
- [9] A. Omont, P. Cox, **A. Beelen**, F. Bertoldi, and C. L. Carilli. AGN and Starbursts at High Redshift Through millimeter detection of dust and molecules. In S. Collin, F. Combes, and I. Shlosman, editors, *ASP Conf. Ser. 290: Active Galactic Nuclei: From Central Engine to Host Galaxy*, pages 583–+, 2003.

Revue

- [1] G. Siringo, A. Weiss, E. Kreysa, F. Schuller, A. Kovacs, **A. Beelen**, W. Esch, H.-P. Gemünd, N. Jethava, G. Lundershausen, K. M. Menten, R. Güsten, F. Bertoldi, C. De Breuck, L.-A. Nyman, E. Haller, and J. Beeman. A New Era in Submillimetre Continuum Astronomy has Begun: LABOCA Starts Operation on APEX. *The Messenger*, 129:2–7, September 2007.

Introduction

Dans le paradigme de la formation hiérarchique des structures, les fluctuations de densité primordiales sont amplifiées par la gravitation et donnent naissance aux halos de matière noire, qui fusionnent en structures de plus en plus massives. Les simulations numériques suggèrent que les premières étoiles se forment à des décalages spectraux de $z \sim 20 - 30$ (Gao et al. 2007), et les trous noirs super-massifs, un peu plus tard, à $z \sim 10$, dans les halos les plus massifs. Après les résultats majeurs des relevés cosmologiques effectués dans le domaine millimétrique, avec SCUBA ou MAMBO (e.g. Greve et al. 2004; Coppin et al. 2006; Bertoldi et al. 2007), ou dans le domaine infrarouge (IR) moyen, avec SPITZER (e.g. Papovich et al. 2004; Dole et al. 2004; Lagache et al. 2004), il est maintenant établi que la majorité de l'énergie produite par l'activité de formation stellaire à grand décalage spectral est absorbée par la poussière et re-émise dans l'IR, principalement dans des galaxies IR lumineuses à $z \sim 1$ et dans des galaxies IR ultra lumineuses (ULIRG) à $z \sim 2$ (Caputi et al. 2007).

Parallèlement à ces études dites de champs profonds, plusieurs groupes se sont intéressés au suivi (sub)millimétrique de sources telles des quasars ou des radio-galaxies à grand décalage spectral $z > 2$ (McMahon et al. 1999; Benford et al. 1999; Carilli et al. 2001; Omont et al. 2001). À travers l'étude de l'émission des poussières, ou de celle du gaz, ces études permettent de sonder l'activité de formation stellaire dans les objets les plus énergétiques et rendent possible la recherche de liens entre activité de formation stellaire et croissance du trou noir super-massif central.

Des simulations numériques montrent que des interactions entre galaxies peuvent amener un sursaut de formation d'étoiles, suggérant le rôle essentiel de l'environnement sur l'activité de formation stellaire (e.g. di Matteo et al. 2007). Les observations des ULIRGs proches montrent également un lien direct entre formation stellaire et environnement, les galaxies les plus lumineuses étant celles ayant le plus d'interactions (e.g. Dasyra et al. 2006). Comme la plupart des galaxies proches, une fraction importante des galaxies (sub)millimétriques présente un noyau actif, dont la masse est proportionnelle à la luminosité du bulbe de la galaxie hôte, suggérant un lien entre le trou noir central et l'activité de formation stellaire (e.g. Gebhardt et al. 2000; Greene & Ho 2006). Étudier l'environnement des galaxies IR lointaines et comprendre les relations liant la formation du trou noir central et la formation stellaire de sa galaxie hôte sont des questions fondamentales pour l'étude de la formation et l'évolution des galaxies.

Mes travaux de recherche, en cosmologie observationnelle, sont dédiés à l'étude de la formation stellaire à grand décalage spectral. Je me suis concentré sur la recherche de la poussière et du gaz dans les quasars à grand décalage spectral à l'aide d'observations (sub-)millimétrique et radio. J'ai ainsi déterminé la température moyenne de leurs poussières (Beelen et al. 2006), et j'ai modélisé en détail les conditions physiques du gaz dans l'un d'eux (Beelen et al. 2004). Je me suis également consacré à l'étude de la formation stellaire globale de l'Univers grâce aux données (sub)-millimétriques de champs profonds que j'ai obtenues, ainsi qu'à la préparation de grands relevés (sub)millimétriques dans l'hémisphère sud et notamment à la mise en service des caméras bolométriques ASZCA et LABOCA et au développement de leur logiciel de traitement de données BOA, sur lequel je reviens dans un document ci-joint. Cela m'a notamment permis de me pencher sur le lien entre effets d'environnement et formation stellaire dans le proto-amas de Francis (Beelen et al. 2008) et d'étudier la contribution au fond diffus IR à sub-millimétrique des galaxies détectées par SPITZER dans l'IR moyen.

Formation stellaire à grand- z et Quasars

L'étude des quasars à grand décalage spectral a été révolutionnée de plusieurs façons. Tout d'abord par la découverte de milliers de quasars à grand décalage spectral, à l'aide de relevés optiques ou IR proche, qui a permis la constitution de grands catalogues de sources, et ce jusqu'à l'époque de la fin de la réionisation (Schneider et al. 2003; Fan et al. 2003). Il a également été montré que la masse des trous noirs massifs, présents au centre de la plupart des galaxies sphéroïdales locales, était corrélée avec la dispersion en vitesse des étoiles de leurs bulbes, suggérant ainsi une formation simultanée des galaxies et des trous noir supermassifs (Gebhardt et al. 2000).

Poussière dans les quasars à grand- z

Les premiers suivis millimétriques de quasars à grand décalage spectral ont mis en évidence que 30% d'entre eux étaient des galaxies IR hyper-lumineuses (Carilli et al. 2001; Omont et al. 2001), et ont montré l'importance du rôle de la poussière comme traceur de la formation stellaire à grand décalage spectral. Je me suis donc intéressé dans un premier temps à l'émission du continu dans l'IR lointain et le domaine radio de quasars optiquement lumineux et radio faibles à des décalages spectraux compris entre $z = 1.9$ et $z = 6.4$. Aux longueurs d'ondes (sub)millimétriques, l'atténuation due à la distance est compensée par le décalage spectral, c'est l'effet de correction K inverse, qui permet d'observer avec la même sensibilité des sources entre $z = 1.5$ et $z = 6$. J'ai participé à de nombreux programmes d'observations avec MAMBO-I/II (Max-Planck Millimeter Bolometer Array) sur la détection de quasars à grand décalage spectral, tant dans la préparation des observations, les observations, que la réduction des données et leur interprétation. Nous avons pu détecter de nombreux quasars indiquant la présence de masses importantes de poussière ($M_{\text{dust}} \sim 10^8 M_{\odot}$) (Omont et al. 2003), y compris pour les sources à $z > 6$, correspondant à la fin de la réionisation (Wang et al. 2007).

J'ai montré que la relation suivie par les ULIRGs locales entre l'émission IR et radio des galaxies à flambée d'étoiles locales est également vérifiée pour les quasars à grand z , indiquant que le chauffage dominant de la poussière provient des étoiles massives nouvellement formées, et non du noyau actif lui-même comme cela avait été suggéré. Cela se traduit par la présence

de poussières tièdes ou froides, contrairement à des poussières chaudes chauffées par le noyau actif. Cela n'avait pu être vérifié que dans un petit nombre de quasars à grand décalage spectral. Pour mesurer la température des poussières dans les quasars à grand décalage spectral, nous avons mis en place un programme d'observation à $350 \mu\text{m}$, avec la caméra de bolomètres SHARC II. J'ai pu ainsi détecter 6 quasars à grand décalage spectral, dont J1148+5251 le quasar le plus distant connu à ce jour. J'ai ainsi pu contraindre les paramètres d'émission de la poussière dans ces sources, qui, sur une distribution spectrale d'énergie composite de l'ensemble des quasars à grand décalage spectral (Fig. 1), présente, en moyenne, une température de $T_{\text{dust}} = 50 \pm 3 \text{ K}$ et un indice spectral de $\beta = 1.6 \pm 0.1$, des valeurs typiquement trouvées dans les galaxies IR locales où la poussière est principalement chauffée par la formation stellaire (Beelen et al. 2006).

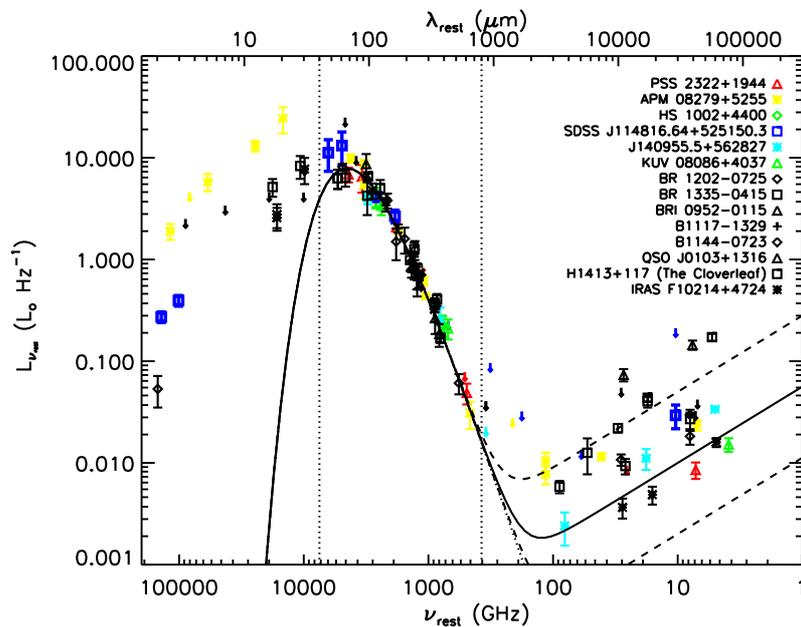


FIG. 1 – Distribution spectrale d'énergie composite de l'ensemble des quasars à grand décalage spectral, la composante de poussière tiède a, en moyenne, une température de $T_{\text{dust}} = 50 \pm 3 \text{ K}$ et un indice spectral de $\beta = 1.6 \pm 0.1$ (Beelen et al. 2006)

Jusqu'à présent, les suivis (sub)millimétriques de quasars à grand décalage spectral ne s'étaient intéressés qu'aux sources optiquement très lumineuses et n'ont pu montrer de corrélation entre l'activité du trou noir supermassif central et celle de formation stellaire de la galaxie hôte (Carilli et al. 2001; Omont et al. 2001; Isaak et al. 2002). C'est pourquoi j'ai mis en place un programme d'étude de l'émission millimétrique de près de 350 quasars à grand décalage spectral et optiquement moins lumineux. Après avoir participé aux observations au 30-m de l'IRAM, qui se sont déroulées en *pool* sur 2 hivers, j'ai mis en évidence une faible corrélation entre la luminosité bleue et la luminosité IR lointain en utilisant des techniques statistiques, dérivés de la biologie, permettant de prendre en compte les limites supérieures des densités de flux sur près de $\sim 70\%$ des sources observées. Cette faible corrélation permet de montrer d'une part que les poussières sont bien chauffées par la formation stellaire et d'autre part relie ainsi l'activité du trou noir supermassif et celle de formation stellaire dans leurs galaxies hôtes (Beelen et al. 2009a, en prép.).

Gaz dans les quasars à grand- z

Les taux de formation stellaire très élevés ($\sim 1000 M_{\odot}/\text{yr}$), estimés à partir de la luminosité IR lointain, indiquent une intense activité de formation stellaire dans ces systèmes, qui, pour être soutenue, nécessite un réservoir important de gaz moléculaire. En effet, si le rapport gaz sur poussière dans ces objets correspond à celui des galaxies locales, on s'attend à y trouver de très grandes quantités de gaz moléculaire. La première détection d'une raie du gaz moléculaire dans un objet à grand décalage spectral a été publiée en 1992, avec la détection la raie de CO ($3 \rightarrow 2$) dans la galaxie IR ultra lumineuse IRAS F10214+4724 à $z = 2.29$, amplifiée gravitationnellement (Brown & Vanden Bout 1992; Solomon et al. 1992).

Dans la suite de ces travaux, j'ai mené un programme d'observation, à l'aide de l'interféromètre du Plateau de Bure, amenant à la détection des raies moléculaires de CO ($3 \rightarrow 2$) et CO ($7 \rightarrow 6$) dans J1409+5828 un quasar optiquement lumineux à $z = 2.58$ (Fig. 2), précédemment détecté à 1.2 mm au 30-m. J'ai pu montrer la présence d'un important réservoir de gaz moléculaire chaud de $6 \times 10^{10} M_{\odot}$. En combinant des observations radio du VLA (Very Large Array) et VLBA (Very Long Baseline Array), j'ai également confirmé la présence d'une forte activité de formation stellaire sur des échelles spatiales comprises entre 1 et 5 kpc (Beelen et al. 2004). J'ai également obtenu des résultats similaires avec la détection de la raie CO ($3 \rightarrow 2$) dans le quasars LBQS 0018 à $z \sim 2$ (Isaak, Beelen et al. en prép).

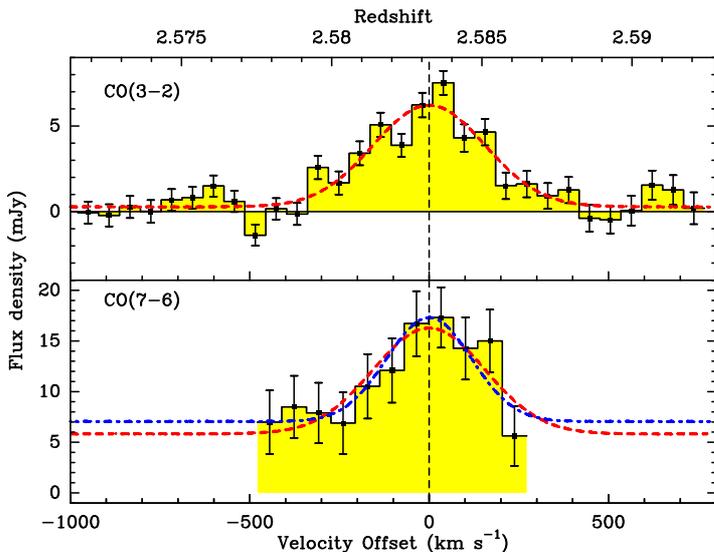


FIG. 2 – Détection des raies de CO ($3 \rightarrow 2$) et CO ($7 \rightarrow 6$) dans J1409+5828 un quasar optiquement lumineux à $z = 2.58$ (Beelen et al. 2004).

Le nombre grandissant de détections de raies moléculaires dans les sources à $z > 1$ permet désormais d'effectuer des études statistiques sur les propriétés des raies détectées. J'ai donc développé une base de données, librement disponible en ligne¹, regroupant l'ensemble des détections des raies moléculaires dans les sources à $z > 1$ dans la littérature ou provenant de communications privées. Elle regroupe plus de 100 raies, principalement de CO, près de 50 mesures de décalage spectral, optique ou IR, et plus de 230 mesures de l'émission continue du domaine sub-millimétrique à la radio dans plus 40 sources, quasars, galaxies sub-millimétrique ou radio galaxies. Cette base est utilisée régulièrement par mes collaborateurs ou lors de travaux de revue (e.g. Solomon & Vanden Bout 2005). De manière homogène, j'ai

¹<http://www.ias.u-psud.fr/beelen/database.xml>

ainsi pu estimer les masses de gaz moléculaire détectées à, en moyenne, $M_{\text{H}_2} \sim 10^{9-10} M_{\odot}$. Dans quelques cas, la détection de plusieurs transitions de CO permet de contraindre les conditions physiques du gaz moléculaire à l'aide de modèle à *Large Velocity Gradient*; avec des températures de 60 – 100 K, et des densités de $10^3 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$, ces conditions sont comparables à celles des galaxies à flambées d'étoiles locales telles M 82 ou Arp 220. En étudiant le rapport $L_{\text{FIR}}/L_{\text{CO}}$, j'ai également montré que les quasars à grand décalage spectral et les galaxies (sub)millimétriques ont une formation stellaire significativement plus efficace que les galaxies locales, normales ou ultra lumineuses (Beelen et al. en prép).

Les détections de multiples raies rotationnelles du monoxyde de carbone (CO) sont maintenant complétées par quelques détections des raies rotationnelles du cyanure d'hydrogène et, pour quelques objets, des raies de structure fine du carbone neutre. Ainsi, j'ai participé au sein de collaborations à la détection du gaz neutre à l'aide d'une raie de carbone neutre CI dans PSS 2322+1944 où j'ai contribué à la réduction et l'interprétation des données (Pety et al. 2004), du gaz moléculaire dense à l'aide de cyanure d'hydrogène (HCN) dans deux quasars où j'ai principalement apporté ma contribution dans l'interprétation des données (Carilli et al. 2005), et, pour la première fois à grand décalage spectral, du carbone ionisé dans SDSS J114816.64+525150.3 où j'ai pu apporter mon expertise lors de la préparation des observations, la réduction et l'interprétation des données (Maiolino et al. 2005). Cette dernière étude a montré que les raies du carbone ionisé restent le principal moyen de refroidissement du gaz même à grand décalage spectral.

Formation stellaire et environnement

De récentes observations ont permis de mettre en évidence une sur-densité de sources submillimétriques autour de radio galaxies à grand décalage spectral (Greve et al. 2007), suggérant ainsi un rôle important de l'environnement dans l'activité de formation stellaire des galaxies. Ces résultats confirment les découvertes faites sur les galaxies IR lumineuses locales montrant une corrélation entre l'activité de formation stellaire et l'interaction ou fusion de plusieurs galaxies.

La sensibilité du satellite SPITZER a permis la détection d'un grand nombre de sources, rendant possible l'étude de leurs corrélations spatiales. Ainsi, Farrah et al. (2006) ont montré que les galaxies IR à $z \sim 2$ et $z \sim 3$, berceaux majeur de l'activité de formation stellaire à grand décalage spectral, étaient parmi les sources les plus regroupées et qu'elles étaient ainsi probablement les progéniteurs des halos les plus massifs que l'on observe aujourd'hui. Afin d'étendre ces études et d'étudier la variation de leur regroupement en fonction du temps, j'ai étudié les corrélations spatiales des sources SPITZER MIPS à 24 et IRAC à $3.6 \mu\text{m}$ dans les champs profonds GOODS, *Extended Chandra South* et *Hubble North*. Pour l'ensemble de ces sources, des décalages spectraux sont disponibles, que ce soit spectroscopiques (50%) ou photométriques, j'ai ainsi pu étudier la variation de leur regroupement en fonction du décalage spectral et déterminer la longueur de corrélation des galaxies IR en fonction du décalage spectral. La taille des champs observés avec SPITZER est néanmoins trop petite pour permettre d'observer significativement une variation de la longueur de corrélation avec le décalage spectral (Beelen et al. en prép.)

Une approche alternative, pour étudier le lien entre formation stellaire et environnement, consiste à rechercher des signatures d'activité de formation d'étoile dans des régions sur-dense

déjà connues. De récents relevés en bande étroite Lyman α ont permis de mettre en évidence des sur-densités de galaxies Ly- α à grand décalage spectral et ont également permis la découverte de nébuleuses étendues en Ly- α (e.g. Francis et al. 1996; Palunas et al. 2004). La nature de ces objets est encore incertaine, une émission Ly- α étendue étant généralement associée à un sursaut de formation stellaire ou à un choc. Quelle que soit la cause de l'émission de ces *Lyman Blobs*, il semble que ce soit des sources IR fortes (Colbert et al. 2006). Afin d'étudier l'effet de l'environnement sur la formation stellaire dans un proto-amas à $z = 2.38$, j'ai mené un suivi à $870 \mu\text{m}$, à l'aide de la matrice de bolomètres LABOCA (Large Apex Bolometer Camera) sur APEX (Atacama Pathfinder EXperiment) d'une des plus grandes structures connues à ce jour à grand décalage spectral. Ce premier champ profond obtenu avec LABOCA a permis la découverte de près de 20 galaxies submillimétriques, dont un *Lyman Blob* et un quasar à $z = 1.795$. En utilisant des critères de couleurs sur les contreparties de ces sources détectées avec SPITZER, j'ai pu montrer qu'elles étaient à un décalage spectral $z > 2$, probablement membres de ce proto-amas. Bien que sur l'ensemble du champ, on n'observe pas de sur-densité significative, j'ai pu mettre en évidence une sur-densité d'un facteur 10 autour du *Lyman Blob*, suggérant ainsi fortement un rôle important de l'environnement sur l'activité de formation stellaire et ouvrant peut-être une fenêtre sur la nature de ces sources (Beelen et al. 2008).

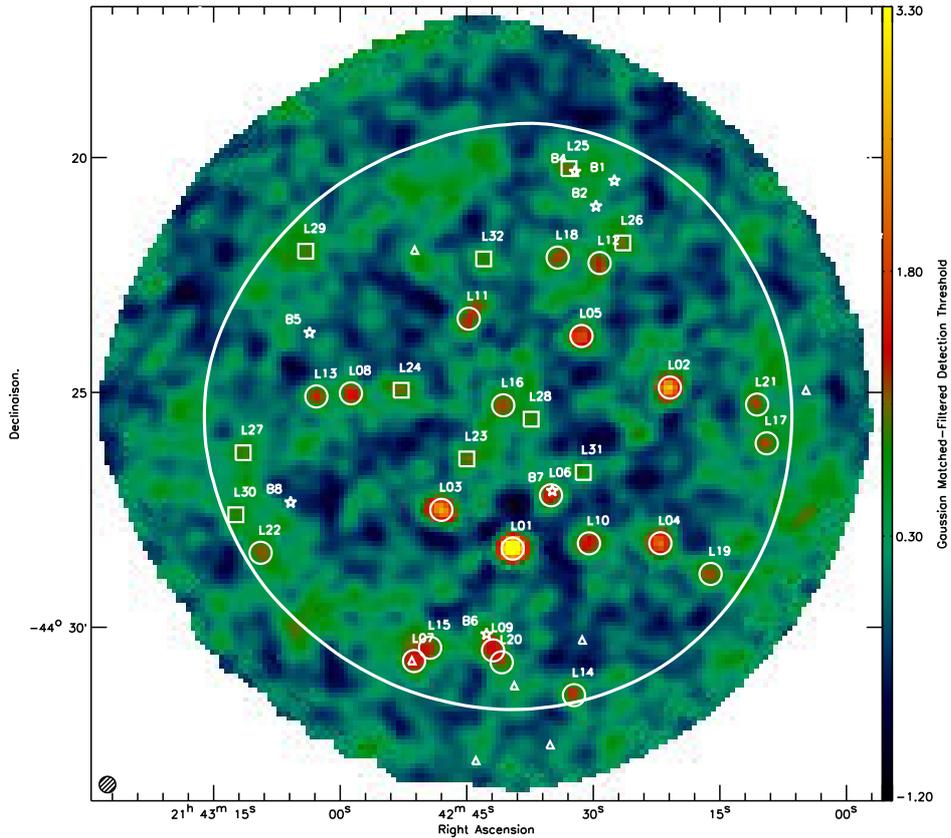


FIG. 3 – Premier champ profond obtenu avec LABOCA sur l'amas de Francis. Les cercles représentent les sources détectées (Beelen et al. 2008).

Fond diffus Infrarouge

L'étude énergétique globale du ciel montre que, après le fond micro-onde cosmologique, la moitié de l'énergie émise dans l'Univers se fait dans le domaine IR lointain et provient de sources obscurcies par de la poussière, que ce soit des étoiles ou des noyaux actifs (Puget et al. 1996). Ainsi, si la majorité de cette émission est due à des étoiles, la moitié des étoiles présentes aujourd'hui ont dû être formées dans des systèmes obscurcis. La nature des sources de ce rayonnement de fond extragalactique est encore incertaine, notamment à certaines longueurs d'onde où la confusion, due à la faible résolution des instruments actuels et la forte densité de sources de faibles flux, fait de ce rayonnement une émission diffuse, non résolue. Les résultats du satellites SPITZER semblent montrer que ce rayonnement de fond est essentiellement constitué de galaxies IR lumineuses à $z \sim 0.7 - 1.5$ et ultra lumineuses à $z \sim 2 - 3$ (Lagache et al. 2004; Caputi et al. 2006). En utilisant une technique dite d'empilement, permettant de descendre au delà du bruit de confusion, Dole et al. (2006) ont montré que les galaxies à $24 \mu\text{m}$ qui contribuent à 80% au fond IR à cette longueur d'onde, représentent plus de 70% de l'énergie du fond IR observé à 70 et 160 μm .

Ce genre d'étude peut être étendu à toutes les longueurs d'onde, ainsi j'étudie la contribution des galaxies SPITZER à $24 \mu\text{m}$ au fond observé à $870 \mu\text{m}$ dans le *Chandra Deep Field South* observé avec LABOCA (Beelen et al. 2009b). La taille importante du champ observé avec LABOCA permet de séparer la contribution des sources à $z < 1$ qui contribuent pour une fraction très faible au fond (Fig. 4). Ainsi les galaxies SPITZER à $24 \mu\text{m}$ ne contribuent que pour la moitié du fond diffus à $870 \mu\text{m}$ qui est donc constitué de sources faibles à des décalages spectraux $z > 1$ et/ou de sources à $z > 2$ dans le cas de sources avec poussières chaudes.

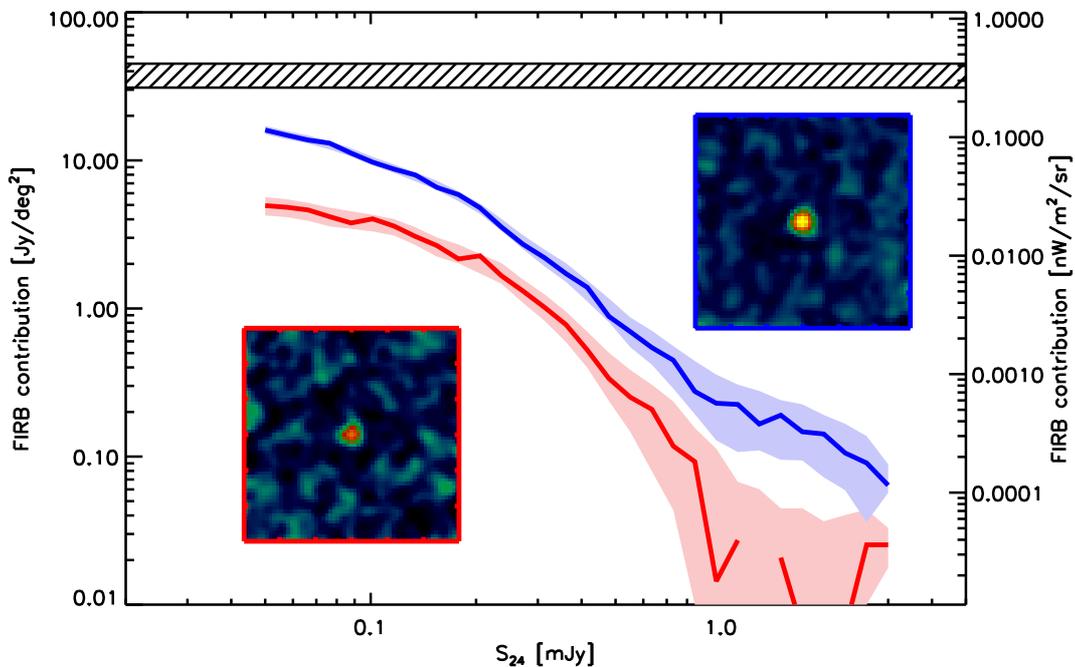


FIG. 4 – Contribution des galaxies $24 \mu\text{m}$ au fond diffus IR à $870 \mu\text{m}$. La courbe inférieurs représente la contribution des sources à $z < 1$ (Beelen et al. 2009b).

De récentes observations ultra-profondes, effectuées à 1.4 GHz sur le champ *Lockman Hole* avec le VLA, permettent de contraindre l'origine de l'émission radio des galaxies IR à grand décalage spectral. J'ai participé à la définition, aux observations et à la réduction des données du suivi de ce champ à 1.2 mm avec MAMBO-II, afin d'étudier l'émission IR à grande longueur d'onde des galaxies IR présentes dans ce champ (Baker et al. en prép). De plus ces données permettront d'étudier la contribution au fond diffus IR à 1.2 mm des galaxies radio mais également SPITZER à 24 μm à l'aide de la technique d'empilement (Beelen et al. en prép). À l'aide d'études préliminaires, où j'ai démontré la faisabilité de la technique d'empilement sur les données MAMBO-II à 1.2 mm, j'ai pu montrer que ces données, observées pendant l'hiver 2006-2007 et 2007-2008 souffraient de nombreux problèmes rendant impossible leur utilisation scientifique pour des cartes de champs profond.

Conclusion

En conclusion, mes travaux en cosmologie observationnelle visent à une meilleure compréhension de la formation stellaire à grand décalage spectral, d'une part en contraignant les conditions physiques dans les galaxies hôtes des quasars, qui sont parmi les objets les plus massifs formés dans l'Univers, et en étudiant l'influence du noyau actif sur la formation stellaire de la galaxie hôte, et d'autre part en étudiant les effets d'environnement sur l'activité de formation stellaire dans la structure sur-dense présente autour des *Lyman Blobs*.

J'ai mené ou participé à un grand nombre de programmes exploratoires, qui ouvrent notamment la voie à l'étude du milieu interstellaire dans l'environnement extrême des premières galaxies à flambées d'étoiles. Ces études connaîtront leur plein essor avec la mise en opération des nouvelles générations d'observatoires, tels que le satellite HERSCHEL et les interféromètres EVLA et ALMA. Les gains en résolution spatiale et en sensibilité ainsi que la possibilité d'observer sur une large gamme de fréquences ou sur des grands champs ouvriront une ère entièrement nouvelle dans la cosmologie observationnelle, que j'ai aidé à défricher. Ces nouveaux observatoires permettront de sonder les conditions physiques et chimiques du milieu interstellaire des galaxies les plus lointaines, sans être limité aux objets extrêmes, et de suivre leur évolution cosmique. Ces progrès rendront également possible l'étude morphologique et cinématique des premières galaxies, avec en particulier la détermination de leur masses dynamiques, testant ainsi directement les prédictions des modèles de formation des structures. La possibilité d'observer de grandes régions du ciel avec une grande sensibilité permettra la découverte de nombreuses sources, rendant ainsi possible des études précises de l'impact de l'environnement sur l'activité de formation stellaire. De plus, une meilleure compréhension de la physique et des propriétés des galaxies IR à grand décalage spectral sera nécessaire pour l'exploitation des données du satellite PLANCK où elles agiront comme un avant plan contaminant important du signal recherché provenant du fonds diffus cosmologique micro-onde.

Références

- Beelen, A., Cox, P., Benford, D. J., et al. 2006, ApJ, 642, 694
- Beelen, A., Cox, P., Omont, A., et al. 2009a, A&A, en préparation
- Beelen, A., Cox, P., Pety, J., et al. 2004, A&A, 423, 441
- Beelen, A., Dole, H., Lagache, G., et al. 2009b, A&A, à soumettre
- Beelen, A., Omont, A., Bavouzet, N., et al. 2008, A&A, 485, 645
- Benford, D. J., Cox, P., Omont, A., Phillips, T. G., & McMahan, R. G. 1999, ApJ, 518, L65
- Bertoldi, F., Carilli, C., Aravena, M., et al. 2007, ApJS, 172, 132
- Brown, R. L. & Vanden Bout, P. A. 1992, ApJ, 397, L11
- Caputi, K. I., Dole, H., Lagache, G., et al. 2006, A&A, 454, 143
- Caputi, K. I., Lagache, G., Yan, L., et al. 2007, ApJ, 660, 97
- Carilli, C. L., Bertoldi, F., Omont, A., et al. 2001, AJ, 122, 1679
- Carilli, C. L., Solomon, P., Vanden Bout, P., et al. 2005, ApJ, 618, 586
- Colbert, J. W., Teplitz, H., Francis, P., et al. 2006, ApJ, 637, L89
- Coppin, K., Chapin, E. L., Mortier, A. M. J., et al. 2006, MNRAS, 372, 1621
- Dasyra, K. M., Tacconi, L. J., Davies, R. I., et al. 2006, ApJ, 651, 835
- di Matteo, P., Combes, F., Melchior, A.-L., & Semelin, B. 2007, A&A, 468, 61
- Dole, H., Lagache, G., Puget, J.-L., et al. 2006, A&A, 451, 417
- Dole, H., Le Floch, E., Pérez-González, P. G., et al. 2004, ApJS, 154, 87
- Fan, X., Strauss, M. A., Schneider, D. P., et al. 2003, AJ, 125, 1649
- Farrah, D., Lonsdale, C. J., Borys, C., et al. 2006, ApJ, 641, L17
- Francis, P. J., Woodgate, B. E., Warren, S. J., et al. 1996, ApJ, 457, 490
- Gao, L., Yoshida, N., Abel, T., et al. 2007, MNRAS, 378, 449
- Gebhardt, K., Bender, R., Bower, G., et al. 2000, ApJ, 539, L13
- Greene, J. E. & Ho, L. C. 2006, ApJ, 641, L21
- Greve, T. R., Ivison, R. J., Bertoldi, F., et al. 2004, MNRAS, 354, 779
- Greve, T. R., Stern, D., Ivison, R. J., et al. 2007, MNRAS, 382, 48
- Isaak, K. G., Priddey, R. S., McMahan, R. G., et al. 2002, MNRAS, 329, 149
- Lagache, G., Dole, H., Puget, J.-L., et al. 2004, ApJS, 154, 112
- Maiolino, R., Cox, P., Caselli, P., et al. 2005, A&A, 440, L51
- McMahon, R. G., Priddey, R. S., Omont, A., Snellen, I., & Withington, S. 1999, MNRAS, 309, L1
- Omont, A., Beelen, A., Bertoldi, F., et al. 2003, A&A, 398, 857
- Omont, A., Cox, P., Bertoldi, F., et al. 2001, A&A, 374, 371
- Palunas, P., Teplitz, H. I., Francis, P. J., Williger, G. M., & Woodgate, B. E. 2004, ApJ, 602, 545
- Papovich, C., Dole, H., Egami, E., et al. 2004, ApJS, 154, 70
- Pety, J., Beelen, A., Cox, P., et al. 2004, A&A, 428, L21
- Puget, J.-L., Abergel, A., Bernard, J.-P., et al. 1996, A&A, 308, L5+
- Schneider, D. P., Fan, X., Hall, P. B., et al. 2003, AJ, 126, 2579
- Solomon, P. M., Downes, D., & Radford, S. J. E. 1992, ApJ, 398, L29
- Solomon, P. M. & Vanden Bout, P. A. 2005, ARA&A, 43, 677
- Wang, R., Carilli, C. L., Beelen, A., et al. 2007, AJ, 134, 617

Introduction

La formation hiérarchique des structures est maintenant un paradigme bien établi. Les observations du satellite WMAP confirment avec grande précision le scénario dans lequel les fluctuations de densités primordiales sont amplifiées en des halos de matière noire de plus en plus massifs. Cependant, l'histoire de la formation stellaire reste une des questions fondamentales, non résolues, pour la compréhension de la formation des structures et de l'histoire de l'Univers. En effet, bien que les relevés profonds effectués du domaine ultra-violet à l'infrarouge aient permis d'établir les premiers scénarios de l'histoire de la formation stellaire, il reste de nombreuses questions en suspens. Quelles ont été les premières sources lumineuses ? Quelles sont les sources responsables de la réionisation de l'Univers ? Comment expliquer la présence de galaxies très massives très tôt dans l'Univers ? L'environnement à grande et petite échelle a-t-il eu une influence sur l'activité de formation stellaire ? Quel est le lien entre trous noirs super-massifs et formation des étoiles dans leurs galaxies hôtes ?

L'arrivée du satellite HERSCHEL conduira à de grandes avancées sur ces questions, en donnant accès à une fenêtre de longueurs d'ondes difficilement exploitable depuis le sol. L'exploitation des grands relevés prévus, pour lesquels l'IAS est fortement impliqué aussi bien dans le cadre du temps garanti ou ouvert, permettra la détection d'un grand nombre de galaxies infrarouges. Leur caractérisation se fera à l'aide de suivis détaillés, notamment grâce à des interféromètres ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*) ou EVLA (*extended Very Large Array*) qui pourront compléter leur distribution spectrale d'énergie à plus grande longueur d'onde mais surtout permettront d'étudier les conditions physiques des grands réservoirs de gaz présents dans ces galaxies capables de soutenir leurs intenses activités de formation stellaire.

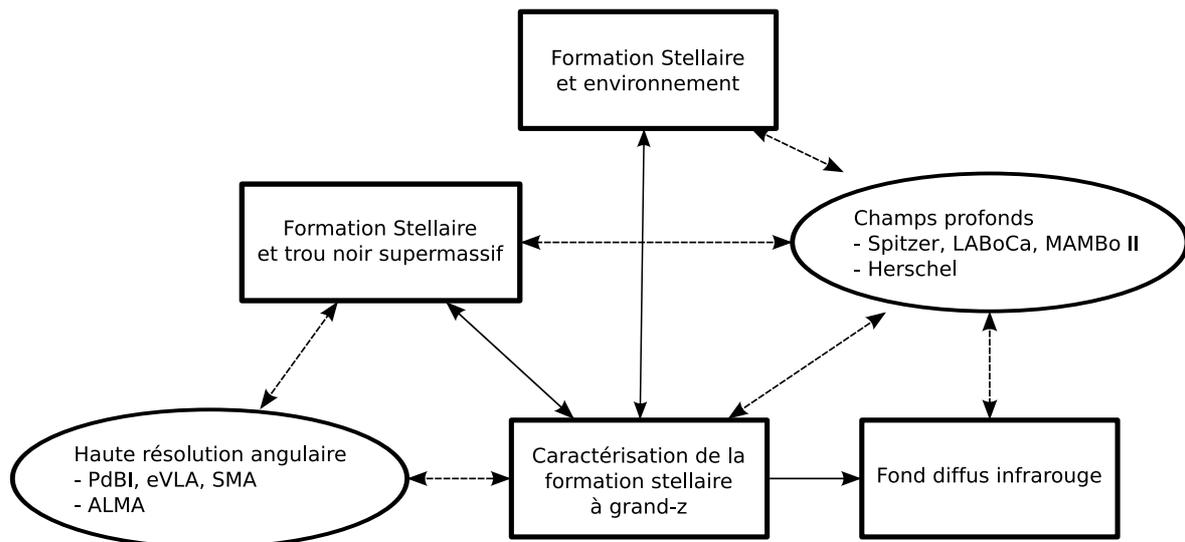


FIG. 1 – Diagramme présentant mes différents thèmes de recherche et leur liens

Après avoir effectué un premier défrichage des conditions dans lesquelles se forment les étoiles tout au long de l'histoire de l'Univers, je souhaite répondre à certaines des questions restées ouvertes sur la formation et l'évolution des galaxies. J'aborderai ainsi deux questions clefs, d'une part, le lien entre activité de formation stellaire et trou noir super-massif, pour comprendre ainsi si leurs activités sont co-temporelles, savoir si le trou noir super-massif a une influence directe sur la formation des étoiles de la galaxie hôte, ou si ces deux activités sont découplées. D'autre part, mes recherches tenteront de répondre aux questions liées à l'impact de l'environnement sur l'activité de formation stellaire, et ainsi de comprendre si les intenses activités de formation d'étoiles que l'on observe à grand décalage spectral peuvent être dûes à des effets de proximité ou de group. Parallèlement, j'affinerai au mieux les différents traceurs de la formation stellaire à grand z et j'aborderai les conditions physiques fines dans lesquels elle se place. Associé aux différentes thématiques développées à l'IAS, de l'étude des propriétés des poussières dans le milieu interstellaire à celle des fonctions de corrélation du fond diffus infrarouge, mon expertise me permettra d'effectuer sur les galaxies infrarouge lointaines, qui seront détectées par HERSHEL et ALMA, les études aujourd'hui seules possibles sur les sources les plus brillantes et notamment les quasars, voire d'aborder certaines questions qui ne trouvent réponse, aujourd'hui, que dans l'Univers local. Ces questions sont résumées sur la figure 1.

Caractériser la formation stellaire à grand z

La formation stellaire à grand décalage spectral a principalement eu lieu dans des galaxies très obscurcies. Les photons issus des étoiles jeunes sont absorbés par la poussière qui ré-émet alors cette énergie dans le domaine infrarouge. Décalé vers le rouge, ce rayonnement est aujourd'hui observé dans les domaines millimétrique et sub-millimétrique. Ce domaine de longueur d'onde est cependant difficilement observable depuis le sol et ne permet que des observations de l'émission, le plus souvent continue, dans quelques fenêtres de longueurs d'onde. De plus, la résolution spatiale actuelle ne permet pas de spatialement résoudre la plupart de ces sources, et, malgré la correction K inverse, les flux de ces sources sont souvent à la limite de détection des instruments les plus sensibles, en particulier à grande longueur d'onde. Dans la plupart des cas, il est donc nécessaire d'extrapoler à grand décalage spectral les modélisations effectuées sur les galaxies locales.

Les sensibilités du satellite HERSCHEL et des interféromètres ALMA et EVLA combinées avec celles du satellite SPITZER, de la caméra SHARC II et des matrices de bolomètres LABOCA, MAMBO II et ASZCA permettront un bon échantillonnage de la distribution spectrale des sources à grand décalage spectral (Fig 2). Les modèles d'émissions de poussières développés à l'IAS dans le cadre de l'émission des grains interstellaires peuvent être appliqués à ces sources afin d'étudier les distributions en taille et la composition des grains de poussières et leurs différentes abondances. En collaboration avec A. Abergel, et F. Boulanger qui applique déjà ces modèles à des sources extragalactiques proches comme Messier 82, je mettrai en place un programme de **modélisation fine de la distribution spectrale d'énergie** du domaine optique à l'infrarouge, d'un échantillon de quasars, de galaxies infrarouges et de galaxies sub-millimétriques (SMG). En connaissant la nature des poussières présentes à $z \sim 6$, il sera alors possible de démarrer une étude en collaboration avec A. Jones et F. Boulanger afin de modéliser la formation des premiers grains de poussières qui ont eu un rôle fondamental dans

la création de l'hydrogène moléculaire et ainsi dans le refroidissement du gaz interstellaire et donc la formation des étoiles. D'autre part, la connaissance des distributions spectrales d'énergie des sources à grand décalage spectral permettra d'affiner les modèles empiriques de formation et d'évolution des galaxies, notamment celui développé à l'IAS sous la direction de G. Lagache.

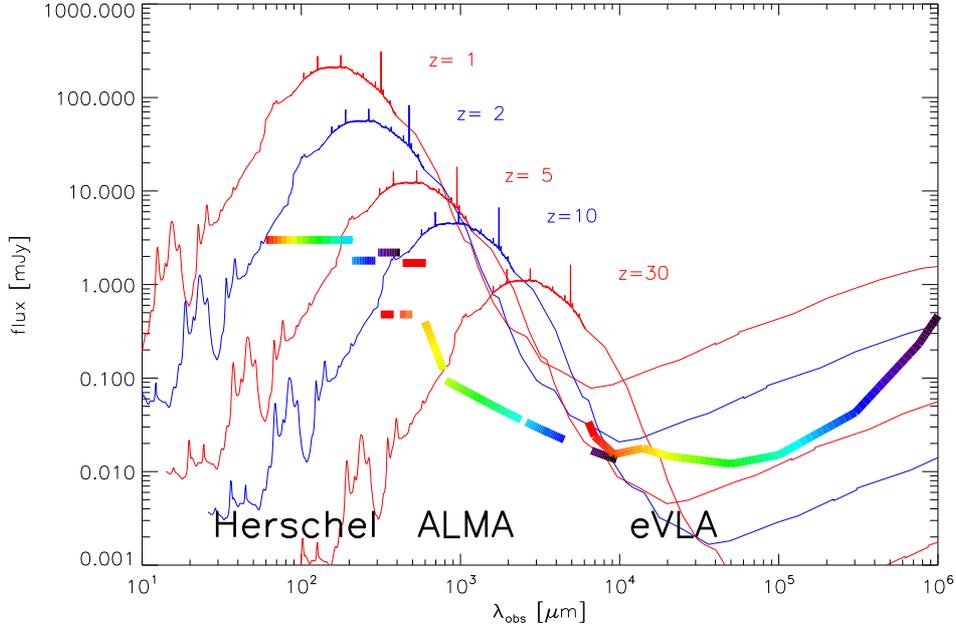


FIG. 2 – Sensibilité à 5σ pour 1 heure d'observation de HERSCHEL, ALMA et EVLA. La distribution spectrale d'énergie présentée est celle de M82 normalisée à $L_{\text{FIR}} = 10^{13} L_{\odot}$

L'étude des conditions physiques du gaz moléculaire présent dans les sources à grand- z apporte des réponses sur les conditions dans lesquelles s'effectue la formation stellaire. Dans un premier temps, je mènerai une modélisation systématique, à l'aide de modèle simple de type *Large Velocity Gradient* des conditions physiques du gaz pour l'ensemble des sources à grand décalage spectral pour lesquelles plusieurs raies moléculaires de monoxyde de carbone (CO) ont été détectées. L'ALMA, l'EVLA et l'interféromètre du Plateau de Bure (PdBI), dont les nouveaux détecteurs permettent d'atteindre des sensibilités élevées, permettront la détection d'une grande partie des transitions moléculaires de CO dans les sources à grand décalage spectral, je pourrai ainsi **déterminer simultanément la température et la densité du gaz moléculaire**. En collaboration avec E. Habart, je pourrai alors modéliser plus finement le milieu interstellaire de ces sources à l'aide de modèles de type *Photo Dissociation Region*, et déterminer les abondances des différentes espèces qui pourront être recherchées par la suite avec le satellite HERSCHEL et l'ALMA notamment C I, [C II], O I, [O III]. Les résultats de ces études permettront de rentrer dans le détail des conditions physiques dans lesquels les étoiles se forment à grand décalage spectral.

Formation stellaire et trou noir super-massif

La majorité des galaxies elliptiques locales et une fraction importante des galaxies à grand décalage spectral possèdent un trou noir super-massif en leur centre. La corrélation entre la

masse du trou noir super-massif et celle du bulbe des galaxies locales, ou de leur dispersion en vitesse, suggère un scénario de formation commun pour les galaxies et leur trou noir central. En soufflant le gaz moléculaire, leur présence est également nécessaire pour expliquer l'arrêt de l'activité de formation stellaire dans les galaxies sphéroïdales et leur évolution passive depuis $z \sim 2$. La question du lien entre formation stellaire et trou noir super-massif est donc centrale dans la compréhension des mécanismes de formation et d'évolution des galaxies.

Avec des masses de trou noir dépassant les $10^4 M_\odot$, et des luminosités importantes, les **quasars** sont d'excellent laboratoire pour tester le lien entre formation stellaire et trous noirs super-massifs à grand décalage spectral. La sensibilité actuelle des matrices de bolomètres permettent d'atteindre des taux de détections de l'ordre de 30% pour les quasars optiquement lumineux à $1 < z < 6$. J'ai pu montrer qu'il n'y avait pas de relation significative entre formation stellaire et activité du trou noir super-massif. Il est cependant possible qu'un continuum de luminosité infrarouge existe, en deçà des sensibilités des observations actuelles, comme semblent indiquer certaines observations récentes profondes effectuées en radio. Avec A. Omont et J. Bergeron à l'Institut d'Astrophysique de Paris, je mets en place une collaboration afin d'observer plus profondément un échantillon restreint de sources ayant des **détections très profondes à 1.4 GHz**. Cela permettra d'utiliser des relevés radio, de grande sensibilité, comme indicateur fiable de l'activité de formation stellaire dans les quasars à grand- z . La sensibilité du satellite HERSCHEL va ici aussi révolutionner ce domaine de recherche, notamment avec le consortium H-ATLAS (*Herschel Astrophysical Terahertz Large Area Survey*), dont je fais partie, qui va observer près de 1000 degrés carrés à plusieurs longueurs d'ondes sub-millimétriques. Ce relevé va permettre la détection directe de près de 440 quasars à $z < 3$ et ~ 210 à plus grand décalage spectral qui permettront de multiplier par 5 le nombre de quasars détectés en infrarouge proche à grand décalage spectral. En utilisant le relevé du *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), dont certains champs seront observés par H-ATLAS et les **techniques d'empilement**, pour lesquelles j'ai développé une expertise à l'IAS, il sera possible d'effectuer une analyse fine dans le plan luminosité – décalage spectral du lien entre formation stellaire et activité du trou noir super-massif.

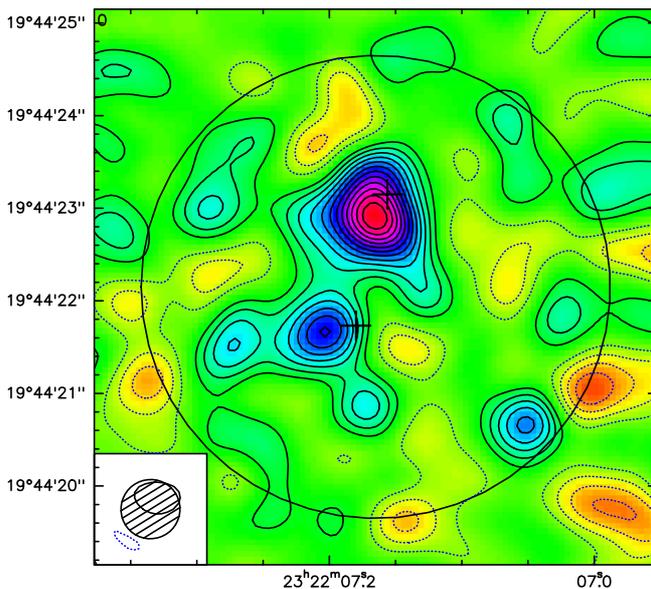


FIG. 3 – Emission de la poussière dans PSS 2322+1944, résolue en deux sources grâce à la haute résolution angulaire accessible au PdBI. Une modélisation fine de l'émission co-spatiale du gaz et de la poussière est maintenant possible (Beelen et al. en prép.).

Les observations à **haute résolution angulaire**, et notamment dans le cas de sources amplifiées gravitationnellement, permettent de sonder plus finement l'émission des sources à grand décalage spectral. Je mène ou participe déjà à plusieurs projets, utilisant le PdBI, l'EVLA ou le Sub-Millimeter Array, afin d'ouvrir une nouvelle fenêtre dans l'analyse de la distribution et la cinématique du gaz et de la poussière autour de quasars à grand décalage spectral. Comme par exemple dans le cas de PSS 2322+1944, un quasar à $z = 4.12$ dont l'émission de CO est désormais résolue, par le PdBI, en deux sources permettant d'effectuer des modélisations fines de l'effet d'amplification gravitationnelle (Fig 3). Avec ses lignes de base de 14 km, l'ALMA permettra de révolutionner ce champ de recherche en rendant possible des observations d'une résolution angulaire de $0.007''$, correspondant à des échelles de l'ordre de 50 pc à $z \sim 5$. De telles échelles ne seront cependant accessibles que pour les sources les plus brillantes, nécessitant des recherches préliminaires afin de sélectionner les sources les plus intéressantes. Ces études me permettront une **analyse détaillée des propriétés physiques des régions à flambée de formation stellaire** présentes autour des trous noirs super-massifs. En particulier, j'estimerai ainsi les **dimensions** des régions de formation d'étoiles ou d'éventuels effets cinématiques, et en déduire leurs **masses dynamiques**. Avec un échantillon plus large, je pourrai alors confirmer ou infirmer une découverte préliminaire obtenue sur SDSS J114816.64+525150.3, un quasar à $z = 6.4$, qui semble suggérer que la relation entre la masse du trou noir super-massif et celle de la galaxie hôte n'est plus valable à ces décalages spectraux et notamment savoir si le trou noir super-massif s'est bel et bien formé avant sa galaxie hôte.

Formation stellaire et environnement

Il existe plusieurs indications de l'impact de l'environnement sur la formation stellaire. Localement, les galaxies infrarouges les plus lumineuses sont celles étant le plus en interaction ou sous l'effet de fusion avec une ou plusieurs autres galaxies. A plus grande échelle, les galaxies infrarouges à $z \sim 2$, traceurs de formation stellaire, sont parmi les sources les plus regroupées spatialement, suggérant ainsi l'importance de l'environnement à grande échelle sur la formation stellaire, contrairement à ce qui est observé dans l'univers proche où les galaxies les plus regroupées sont celles où il n'y a plus ou peu de formation stellaire.

Les SMGs sont parmi les objets les plus massifs, et on pense qu'ils sont probablement au centre des halos de matière noire les plus massifs. Elles devraient donc être un excellent traceur des sur-densités de matière noire. Cependant la sensibilité des instruments actuels ne permet pas d'observer de grandes régions du ciel afin de mener ce type d'étude. Avec l'arrivée de grandes matrices de bolomètres comme LABOCA ou bientôt SCUBA II, il est possible d'effectuer des études significatives de **regroupement sur les SMGs**, et ainsi comprendre si l'environnement a un rôle important dans leur **activité extrême de formation stellaire**. Je prépare ainsi un large programme d'observation sur la matrice de bolomètre LABOCA afin d'étendre les observations existantes sur de grandes régions du ciel, centré sur le *Chandra Deep Field South* (CDFS) et le *Akari Deep Field South* qui permettra d'obtenir une statistique significative. Je pourrai ainsi calculer la fonction de corrélation de SMGs et confirmer les résultats préliminaires que j'ai pu obtenir dans le CDFS. Parallèlement à ces études de champs profonds, je m'intéresse aussi à l'**environnement des quasars**, qui sont parmi les objets les plus massifs dans l'Univers et qui sont également de bons traceurs des sur-densités

de matière noire. Je définis donc à un programme de suivi à $870\ \mu\text{m}$ et $1.2\ \text{mm}$ de petites cartes centrées autour de quasars optiques. L'étude de leur environnement permettra de mettre en évidence, à plus petite échelle, des sur-concentrations de galaxies (sub)-millimétriques, confirmant ainsi le lien entre formation stellaire et environnement.

J'ai montré que la taille des champs GOODS observés avec le satellite SPITZER était insuffisante pour permettre d'étudier une **variation significative du regroupement des galaxies infrarouges en fonction du décalage spectral**. Les données profondes sur des champs plus étendus comme le *Extended Groth Strip* du relevé FIDEL par SPITZER, et surtout les grands champs observés avec HERSCHEL dans le programme H-ATLAS, me permettront de poursuivre ces études et d'apporter des réponses concluantes sur la variation possible de la longueur de corrélation avec le décalage spectral. Il sera cependant nécessaire d'estimer le décalage spectral des sources détectées dans ces champs, ce qui, dans le cadre du consortium H-ATLAS sera fait en utilisant des techniques photométriques sur l'ensemble des longueurs d'onde observées. De plus, grâce à la grande sensibilité de ces observations, j'effectuerai ces études en séparant galaxies infrarouges lumineuses d'une part et ultra lumineuses d'autre part, afin d'étudier les **effets de l'environnement en fonction de la luminosité** des sources. En étudiant le regroupement de ces galaxies, je pourrai déterminer les variations du biais entre matière noire et galaxies infrarouges en fonction du décalage spectral. Je comparerai alors le résultat de ces travaux avec les recherches menées par G. Lagache à l'IAS sur les fluctuations du fond diffus infrarouge, traceur du regroupement des galaxies non détectées.

Fond diffus infrarouge

L'émission intégrée de toutes les galaxies constitue le fond extragalactique lumineux (EBL), observé dans le domaine infrarouge, on parle alors du fond diffus infrarouge (CIB). Ce fond diffus est une mesure intégrée dans le temps de toute l'histoire de formation stellaire de l'Univers. L'étude de ce dernier a effectué de grand progrès grâce à la technique d'empilement dont l'IAS est un acteur majeur. Ainsi, en utilisant cette technique H. Dole et ses collaborateurs ont pu montrer que les galaxies infrarouges détectées à $24\ \mu\text{m}$ par SPITZER constituent 80% de l'énergie du fond diffus infrarouge à cette longueur d'onde et également une fraction importante de ce fond à 70 et $160\ \mu\text{m}$. Cependant le fond diffus infrarouge est mal contraint à plus grande longueur d'onde.

Je mène deux études complémentaires, d'une part sur la contribution des radio-galaxies du relevé radio ultra-profond effectué au VLA dans le Lockman Hole au **fond observé à $1.2\ \text{mm}$** par MAMBO II (fig 4), en collaboration avec A. Baker (Rutgers University), et d'autre part, sur la contribution des galaxies infrarouges détectées à $24\ \mu\text{m}$ par SPITZER au **fond infrarouge à $870\ \mu\text{m}$** observé avec LABOCA dans le CDFS. Dans ce dernier cas, j'ai montré que leur contribution ne permettait d'expliquer que la moitié du fond, ce qui semble indiquer que la moitié des sources constituant le fond à $870\ \mu\text{m}$ soient des sources non détectées à $24\ \mu\text{m}$, ce qui pourrait être expliqué par une température de poussière plus froide, changeant la couleur $24\ \mu\text{m}/870\ \mu\text{m}$, ou un décalage spectral plus élevé.

Ces études dans leur ensemble ne peuvent donner que des réponses globales sur l'histoire de la formation stellaire dans l'Univers. En collaboration avec H. Dole et G. Lagache, je cherche désormais à affiner ces études en étudiant **les contributions au fond diffus infrarouge en fonction du décalage spectral ou de la luminosité** des sources notamment à l'aide

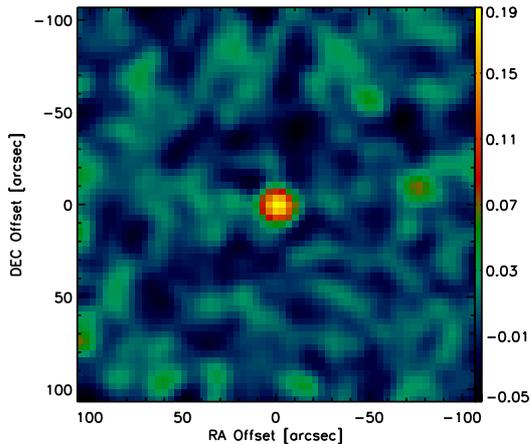


FIG. 4 – Empilement à 1.2 mm (MAMBO II) des sources radio dans le Lockman Hole. La contribution au fond diffus infrarouge à 1.2 mm des galaxies radio est désormais quantifiable.

des observations du consortium H-ATLAS sur HERSCHEL à 100, 160, 250, 350 et 500 μm . En estimant la valeur du fonds diffus infrarouge à ces longueurs d’ondes, et la contribution respective de différents échantillons de galaxies, j’apporterai des contraintes fortes pour les modèles de formation et d’évolution de galaxies, notamment pour celui développé à l’IAS, que je pourrai alors faire évoluer pour tenir compte au mieux de ces observations.

Conclusion

Ces recherches permettent d’ouvrir de nouvelles pistes dans l’étude de la formation stellaire de l’Univers. D’une part en étudiant les conditions dans lesquelles se forment les étoiles dans des sources individuelles telles que les galaxies infrarouges ou les quasars, et d’autre part en étudiant de façon plus globale l’histoire de la formation stellaire à travers les relevés profonds avec notamment les études d’empilement. Ces champs de recherches vont connaître leur plein essor avec l’arrivée de l’interféromètre ALMA et du satellite HERSCHEL. Afin de participer à la révolution que vont apporter ces observatoires, je fais partie du consortium H-ATLAS sur HERSCHEL dans lequel je participe à la réduction de l’exploitation des données, notamment dans le traitement fin de l’émission étendue où j’apporterai une expertise sur des techniques novatrices de création de cartes, ou dans la construction des catalogues de sources détectés et de leur robustesse.

J’apporterai à l’IAS mon expertise sur le traitement de données bolométriques et interférométrique qui seront précieuses pour analyser les résultats des satellites HERSCHEL et PLANCK et de l’interféromètre ALMA. En plus de pouvoir interagir étroitement avec mes collaborateurs proches à l’IAS, j’apporterai également mon expérience dans l’identification des galaxies infrarouges et sub-millimétriques et l’analyse de leur distribution spectrale d’énergie, de leur contenu en gaz moléculaire et atomique, ou encore des techniques statistiques tenant compte des limites inférieures ou supérieures dans les échantillons étudiés. Mes travaux sur l’activité de formation stellaire dans les environnements sur-denses, le regroupement des galaxies infrarouges ou la nature des poussières découvertes à grand décalage spectral seront ainsi valorisés au sein de l’équipe “Milieu Interstellaire et Cosmologie”. A plus long terme, mon expertise en gestion de grands volumes de données, de création de cartes optimales, de détection de sources ou de techniques statistiques avancées accompagneront naturellement cette équipe tout au long de ma carrière et m’inviteront naturellement à participer dans ses projets futurs (JWST/MIRI, SPICA, BPOL, EUCLID/JDEM, ...).

Parmi les différents corps de recherche en Astronomie et Astrophysique, celui des Astronomes permet de réunir mes activités de recherche, mon désir de partage des connaissances et la possibilité de mettre mes compétences à disposition de la communauté. Dans un premier temps, je décris les tâches de service que j'ai déjà effectuées. Je présente ensuite celles que je propose de mener dans le cadre de mon recrutement comme astronome-adjoint à savoir à court terme la **mise en place de chaînes de traitement de haut niveau pour HERSCHEL/SPIRE et, plus généralement, de prendre la responsabilité du centre grandes longueurs d'ondes du IDOC (*IAS Data and Operation Center*)**. Enfin, je décrirai quelques pistes possibles de mon implication dans les filières de l'Université Paris-Sud XI.

Tâches de service effectuées

Gestion des observations de MAMBO-2 à l'IRAM

Dès le début de ma thèse, j'ai commencé à développer des outils pour la communauté. En effet, lors de mon premier séjour au télescope de 30m de l'Institut de RadioAstronomie Millimétrique (IRAM) en décembre 2001, j'ai défini et mis en place un prototype de système de gestion des observations de l'instrument *Max-Planck Millimeter Bolometer* (MaMBo-2), permettant la surveillance de l'accomplissement des projets, ainsi que la gestion des priorités inter et intra projets. Ce système a permis le bon déroulement des observations et l'optimisation du temps télescope. Fort de ce succès, ce système a été repris, développé, et étendu par Axel Weiss, à l'IRAM-Granada, et est aujourd'hui utilisé intensivement par tous les observateurs au 30m.

Développement du logiciel de traitement BoA

L'arrivée de grandes caméras bolométriques telles MAMBO-2 ou *Large Apex Bolometer CAmera* (LABOCA), avec respectivement 117 et 295 bolomètres, ont nécessité de nouveaux outils de traitement de données. Pendant ma thèse, j'ai participé à la définition du *Bolometer array Analysis software* (BoA). Lors de mon séjour post-doctoral, conjointement au *Max-Planck-Institut-für-Radioastronomie* et à l'université de Bonn, j'ai dirigé et participé au développement BoA, en restructurant le code afin d'en rendre le développement ouvert. Ainsi, j'ai inclus les outils permettant la caractérisation des instruments et implémenté l'ensemble des procédures nécessaires aux traitements de données de matrice de bolomètres au sol et à la production de cartes d'intérêt astrophysique. L'équipe de développement était constituée de 4 post-doctorants, 2 doctorants et un ingénieur. Ce logiciel a été testé et utilisé lors des premiers essais des matrices de bolomètres *Apex SZ Camera* (ASZCA) et LABOCA au foyer de l'antenne *Atacama Pathfinder Experiment* (APEX). Lors de ces observations nous avons analysé les données provenant de ces instruments. BoA a ainsi permis de caractériser ces deux instruments, que ce soit la position relative de leurs bolomètres, leurs gains ou leurs sensibilités. Nous avons également pu mettre en évidence certains problèmes de l'électronique de lecture, de l'acquisition des données ou du contrôle de l'antenne. Depuis, ce logiciel est utilisé quotidiennement aussi bien lors de l'acquisition de données, pour corriger les pointages

et les mises au point, que pour la réduction fine des données indispensable à leur exploitation astrophysique.

Tâches de services proposées

SO2/SO5

Chaînes de traitement de haut niveau pour HERSCHEL/SPIRE et Centre grandes longueurs d'ondes d'IDOC

Le satellite HERSCHEL va bientôt être lancé avec à son bord 3 instruments pour observer le ciel entre 50 et 600 μm . Avec sa grande sensibilité et un champ de vue important, il permettra de mener rapidement de grands relevés photométriques du ciel. Au-delà de la détection et de l'étude des sources ponctuelles que ce soit des galaxies, des régions de formation stellaire compactes ou des étoiles, HERSCHEL/SPIRE permettra l'étude d'objets résolus spatialement, des nuages interstellaires jusqu'au fond diffus infrarouge sur de grandes échelles angulaires. Reconnu par tout l'ensemble du consortium SPIRE comme étant crucial à l'exploitation scientifique de ses données, l'IAS a pris la responsabilité du développement d'une chaîne de traitement de haut niveau pour l'émission étendue. Les méthodes de réduction de données développées pour la mission PLANCK, utilisant les redondances naturelles spécifiques à un relevé complet du ciel, ne peuvent pas être appliquées aux données d'HERSCHEL/SPIRE. C'est pourquoi, je propose de mener à court terme (3 - 5 ans) une première tâche de service comme astronome adjoint, labélisée S02. En pratique elle contient deux volets :

- le développement et la mise en oeuvre de méthodes de traitement avancées des données (sub-)millimétriques afin de préserver l'émission aux grandes échelles,
- et la validation de ces méthodes à l'aide de simulations réalistes de ciel à toutes les échelles spatiales.

Ces activités sont complémentaires à celles déjà engagées dans les *Instrument Control Centre* (ICC) qui se concentrent essentiellement sur un traitement de données optimisé pour les sources ponctuelles.

Le traitement et la calibration de l'émission étendue diffèrent de ceux appliqués aux sources ponctuelles. En effet, de nombreux effets empêchent la récupération des grandes échelles spatiales, parmi eux, citons : les dérives thermiques d'un télescope chaud ; les dérives instrumentales engendrées par l'électronique ; les problèmes de méconnaissance des lobes ; le sous-échantillonnage du ciel dans le cas de matrices à cornet, par exemple ; le mode d'observation, notamment avec un secondaire oscillant. Pour corriger de ces effets, plusieurs méthodes ont été développées, par exemple en utilisant l'algorithme de Emerson-Klein-Haslam dans le cas d'observation au sol à l'aide d'un secondaire modulant, ou des méthodes basées sur le maximum de vraisemblance (ML) dans l'étude de l'émission du fond diffus cosmologique ou enfin plus récemment des méthodes d'inversion bayésienne qui ont été appliquées à des observations du satellite SPITZER. Enfin, d'autres approches essayent de corriger empiriquement de ces effets mais introduisent un filtrage incontrôlé des données.

Avec l'expérience acquise avec le satellite ISO, l'IAS a une grande expérience dans la mise au point de chaînes de traitement de haut niveau de l'émission étendue, largement utilisé par toute la communauté. Notamment, une collaboration étroite avec le laboratoire des signaux et systèmes (L2S, Orsay) a été mise en place dans le cadre du traitement des données des instru-

ments MIPS et IRS à bord du satellite SPITZER. Les algorithmes développés au L2S se basent sur des **méthodes d'inversion bayésienne** permettant de prendre directement en compte de nombreux effets instrumentaux, à travers un modèle d'instrument. Elles permettent notamment d'effectuer simultanément une déconvolution spatiale, permettant une étude détaillée à des échelles spatiales inaccessibles par les méthodes de traitement de données actuelles. Ces méthodes ont donné d'excellents résultats mais n'ont cependant pas été intégrées dans une chaîne de traitement de données. En collaboration avec les chercheurs de la division Signaux du L2S, je participe à la construction du modèle d'instrument de HERSCHEL/SPIRE nécessaire à l'établissement de l'algorithme d'inversion bayésienne. Les premiers tests de cette méthode sont actuellement en cours.

Guillaume Patanchon (Laboratoire AstroParticule et Cosmologie) a récemment généralisé les **algorithmes de ML en tenant compte des corrélations entre détecteurs**. Cette nouvelle approche, SANEPIC, a été testée et utilisée sur les données du ballon BLAST. Elle a permis de prendre en compte les dérives instrumentales des détecteurs et leur différentes inter-corrélations qui peuvent apparaître dans les circuits électroniques ou du fait de la dérive thermique des miroirs. J'ai adapté cette méthode avec succès dans le cas extrême des données de la caméra bolométrique au sol LABOCA où l'atmosphère émet de façon fortement corrélée sur l'ensemble de la matrice. Pour HERSCHEL, les dérives thermiques du miroir primaire et les dérives électroniques engendrent un bruit corrélé entre détecteurs. En adaptant SANEPIC, je pourrai donc faire en sorte que ces effets soient naturellement corrigés, afin de produire des cartes optimales où l'émission étendue sera correctement prise en compte.

Dans un premier temps, je propose de développer une **chaîne de traitement de haut niveau** en intégrant ces deux approches (ML et inversion bayésienne) afin d'optimiser le traitement de l'émission étendue dans les données d'HERSCHEL/SPIRE. La **validation de ces différentes méthodes** est une étape cruciale. J'utiliserai pour cela des simulations réalistes du ciel à toutes les longueurs spectrales et spatiales, en me basant par exemple sur les modèles développés à l'IAS. Cette validation permettra de comprendre notamment quel filtrage est appliqué aux données en fonction des modes d'observations utilisés. Ces travaux permettront la production de cartes de haut niveau, photométriquement étalonnées à toutes les échelles spatiales. En pratique, ces cartes ainsi que les outils développés seront **mises à la disposition de la communauté** à travers l'Observatoire Virtuel (OV) au CDS ou à l'ESA. Ces cartes seront aussi utilisées pour inter-étalonner HERSCHEL/SPIRE et PLANCK/HFI. Apportant les petites échelles spatiales, elles rendront possible une compréhension détaillée des émissions d'avant plan dans l'étude du fond diffus cosmologique. Étant laboratoire *PI* de PLANCK/HFI, l'IAS est dans une position centrale, au coeur de ces problématiques.

La tâche de service que je propose de mener se poursuivra à plus long terme sous un label SO5. Je compte en effet prendre la **responsabilité de l'ensemble des activités grandes longueurs d'onde du centre IDOC**. Créé à l'IAS il y a 12 ans pour SOHO, le centre MEDOC, premier centre de données spatiales et d'opérations en France, a évolué en IDOC pour inclure toutes les thématiques scientifiques de l'IAS : physique solaire, planétologie et astrophysique grande longueur d'onde (ISO, PLANCK et HERSCHEL). Je m'impliquerai largement sur la mise au point d'algorithmes et de pipelines pour le traitement de haut niveau des données attendues des futurs projets (sub-)millimétriques et infrarouge proche de la discipline (JWST/MIRI, SPICA, BPOL, EUCLID/JDEM ...). Les activités couvertes par cette composante à grandes longueurs d'ondes d'IDOC inclura également les développements d'outils d'analyse tels que des méth-

odes de séparation des composantes, des outils étudiant la non-gaussianité ou les corrélations croisées. Tant les données de haut niveau produites que les logiciels utilisés seront diffusés à la communauté nationale et internationale, notamment à travers l'OV. Cette activité dont je prendrai la responsabilité scientifique s'appuiera sur l'environnement technique mutualisé, en terme de personnel et de moyens de calcul, du centre IDOC. Elle garantira une exploitation optimale des données en s'assurant de la pérennité et de la progression du savoir-faire dans la communauté d'un projet à l'autre (depuis ISO, puis SPITZER, HERSCHEL, PLANCK, JWST, ...).

Enseignement

Pendant ma thèse, j'ai effectué un monitorat à l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines et encadré des travaux dirigés et des travaux pratiques (Ondes, mécanique, dynamique, mécanique des fluides et optique, en DEUG et licence de science de la vie ainsi qu'en licence de physique fondamentale). J'ai également co-encadré les travaux pratiques d'informatique des étudiants des DEA d'Astrophysique d'Île-de-France. Plus récemment, j'ai eu la responsabilité de *teaching assistant* pour les cours sur les bolomètres lors de l'école d'été de l'IRAM à Pradollano en Espagne. Ces expériences d'enseignement m'ont permis de développer un goût pour le partage des connaissances, complémentaire à tout travail de recherche. Enfin, j'ai étroitement participé à la formation de 4 jeunes chercheurs, avec actuellement la responsabilité d'un post-doctorant chinois pour un séjour de 3 mois.

L'IAS est fortement impliqué dans tous les cursus pédagogiques de l'Université Paris-Sud. En effet, nombre de ses chercheurs y ont des charges d'enseignement, notamment au sein de la spécialité "Astronomie & Astrophysique" et "Noyaux, Particules, Astroparticules & Cosmologie" de deuxième année de Master. L'IAS organise de nombreux travaux pratiques, en particulier en traitement du signal et simulation numérique. Mon insertion pédagogique se fera naturellement, notamment en y apportant mon expérience d'observation, de simulation et de traitement de données dans les domaines (sub)millimétrique et radio pour former les étudiants et les jeunes chercheurs à l'utilisation des grandes matrices de bolomètres actuelles telles MAMBO-2, LABOCA ou à venir, ou des matrices de bolomètres à bords des satellites HERSCHEL et PLANCK, mais également à la technique d'observation interférométrique, avec par exemple le Plateau de Bure ou le *Very Large Array* en vue de l'exploitation scientifique de l'interféromètre ALMA par la communauté française. Enfin, je souhaite également enseigner la physique dans le cursus de l'Université Paris-Sud XI, de la licence au master.