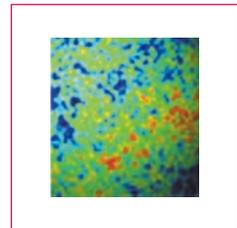


Le fond infrarouge de galaxies livre ses secrets



Hervé Dole, Guilaine Lagache, Jean-Loup Puget

Herve.Dole@ias.u-psud.fr, Guilaine.Lagache@ias.u-psud.fr, Jean-Loup.Puget@ias.u-psud.fr

Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay, CNRS et Université Paris-Sud 11 (UMR 8617)

La formation et l'évolution des galaxies ne sont pas encore comprises en détail. Les nombreux relevés cosmologiques menés pour mieux en comprendre les processus physiques ont permis la découverte du rayonnement fossile des galaxies : le fond extragalactique infrarouge. Comment ce rayonnement infrarouge s'est-il formé ? Pourquoi les galaxies émettent-elles en moyenne plus d'énergie dans l'infrarouge que dans le visible ? Qu'est-ce qu'une galaxie infrarouge : est-ce un type particulier de galaxie ou une phase de l'évolution des structures ? De nouvelles observations depuis l'espace permettent de répondre en partie à ces questions, en attendant les données des satellites européens Herschel et Planck.

L'Univers extérieur à notre Galaxie est baigné de nombreux rayonnements, dont le principal est observable dans le domaine des ondes radio centimétriques et millimétriques : le fond cosmologique (ou CMB pour *Cosmic Microwave Background*), corps noir de température actuelle 2.7 Kelvin, soit environ -270 degrés Celsius. Découvert dans les années soixante, et largement étudié depuis pour ses infimes fluctuations de température et de polarisation, il se propage librement depuis une époque située environ 400 000 ans après le big-bang. Il nous renseigne sur l'état de l'Univers primordial, sur son contenu, ainsi que sur certains processus physiques ultérieurs, comme la réionisation ou la formation des amas de galaxies.

Un autre rayonnement d'importance cosmologique a été découvert il y a seulement treize ans, dans les données du satellite COBE, mais dans le domaine de l'infrarouge lointain, vers 200 microns de longueur d'onde : le rayonnement de fond des galaxies, ou fond diffus extragalactique infrarouge. Il est environ 200 fois moins intense que le fond cosmologique. Cette détection a constitué une grande surprise vu la grande intensité relative de l'infrarouge lointain par rapport à la partie visible émise directement par les étoiles. Ce fond diffus a pour origine l'émission de toutes les galaxies depuis leur formation, et résume ainsi toute leur histoire. Mesurer précisément ce rayonnement de fond et comprendre la nature et l'évolution des galaxies émettrices constitue l'un des objectifs importants de la cosmologie observationnelle. Ainsi, de grands relevés de galaxies sont menés, tant au sol que depuis l'espace, pour que ce rayonnement des galaxies nous livre ses secrets.

La différence entre le fond cosmologique et le fond extragalactique infrarouge lointain (nous abandonnerons dans la suite le qualificatif « lointain » pour plus de lisibilité) vient de l'époque concernée de l'Univers : l'Univers jeune (environ 400 000 ans), diffus et très homogène dans le premier cas, l'Univers plus vieux (d'environ 0,4 à 13 milliards d'années) et déjà composé de structures, comme des amas et galaxies non résolus par nos moyens d'observation, dans le second cas (*figure 1*). L'ensemble de ces fonds constitue l'essentiel du contenu électromagnétique de l'Univers actuel, largement dominé par le CMB (environ 95% de l'énergie). Nous discutons, dans cet article, ce qu'apporte l'observation du fond de rayonnement infrarouge à notre compréhension de la formation des structures¹ en cosmologie (*figure 4*).

La formation des galaxies

Avant l'époque de la formation des atomes, responsable du découplage matière-rayonnement vers 400 000 ans² après le big-bang, l'Univers était un plasma de matière et photons. Ce plasma oscillait selon des modes qui dépendent de son contenu et ces oscillations de matière ionisée et de photons, dites acoustiques, ont été le vecteur de transport de l'information depuis les phases primordiales.

1. On entend par « structure » ou « grande structure » les galaxies, amas de galaxies, super-amas de galaxies, filaments, et plus généralement des surdensités de matière structurées à grande échelle.
2. Correspondant à un redshift (ou décalage spectral vers le rouge cosmologique) d'environ 1100.

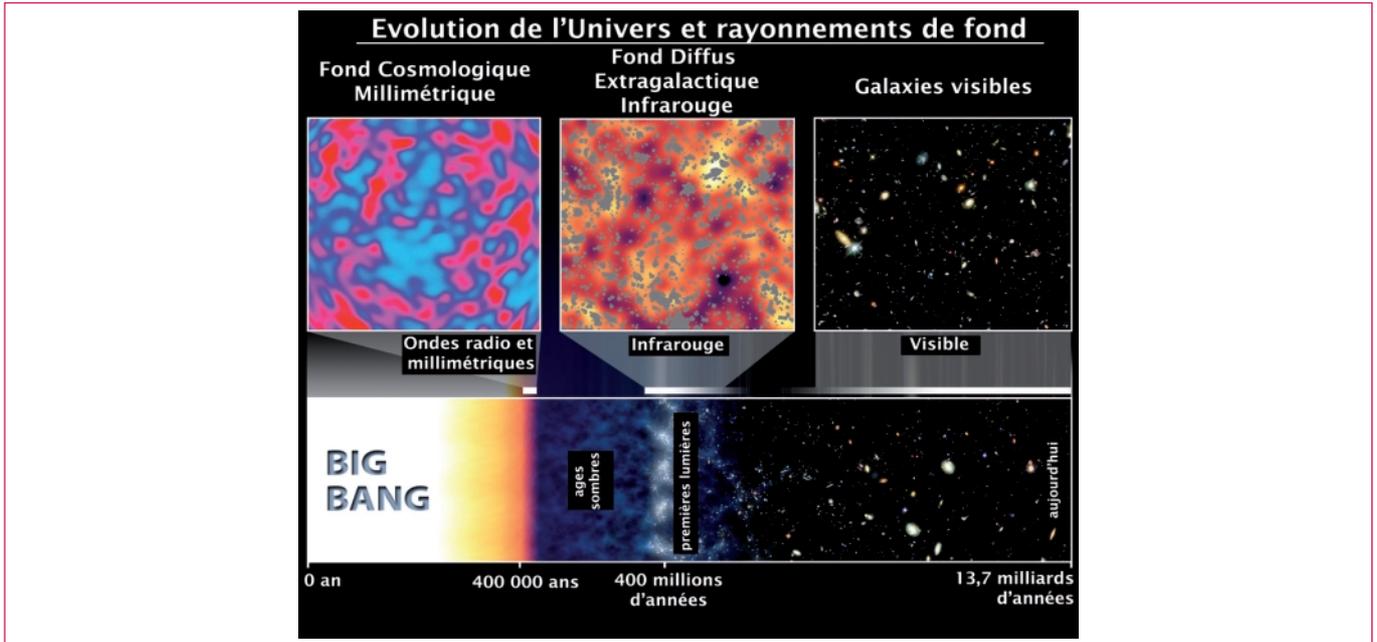


Figure 1 – Illustration de l'époque cosmique sondée avec les rayonnements de fond : le fond cosmologique dans le domaine des ondes radio et millimétriques (époque : environ 400 000 ans) ; le fond infrarouge de galaxies (dont l'émission a débuté environ 400 millions d'années après le Big-bang mais se poursuit jusqu'à aujourd'hui) ; les galaxies individuelles dans le domaine visible (époque : environ 1 milliard d'années à aujourd'hui). Image : H. Dole, d'après Spitzer/NASA/JPL-Caltech/Kashlinsky (GSFC).

Des oscillations acoustiques du même type se produisent d'ailleurs actuellement au cœur des étoiles et du Soleil, qui transportent l'information sur la physique du cœur jusqu'à la surface où les variations correspondantes de densité du rayonnement électromagnétique les rend détectables. Après le découplage, les oscillations acoustiques se sont arrêtées ; leurs effets sont observés aujourd'hui dans les fluctuations de température du fond cosmologique. Les surdensités de matière, initiées par ces oscillations interrompues, ont ensuite pu croître par effondrement gravitationnel malgré l'expansion de l'Univers, pour former de grandes concentrations de matière (appelées halos) qui, plus tard, deviendront les structures de l'Univers – amas de galaxies et galaxies. Les halos sont dominés par la matière noire, dont le potentiel provoque l'effondrement de la matière ordinaire (un gaz de baryons), qui se condense et se refroidit pour former des étoiles. Les halos et galaxies, relativement petits au début, fusionnent puis forment des systèmes de plus en plus massifs avec le temps. C'est, en substance, ce que prévoient la plupart des modèles de formation des structures en cosmologie, dits de formation hiérarchique³.

Ces modèles réussissent non seulement à reproduire de nombreuses observables (comme les fluctuations de température du CMB et les fluctuations de densité de matière), mais aussi à prédire des phénomènes observés ultérieurement (comme les oscillations dans la distribution spatiale des galaxies). Malgré leurs succès, ces modèles butent sur une limitation fondamentale : la physique fine des baryons,

en particulier leur lien avec la matière noire, et les processus physiques de formation stellaire et d'accrétion. En effet, les modèles ne prédisent avec précision que le comportement de la matière noire. Or, l'information obtenue par l'observation des galaxies provient essentiellement du rayonnement issu du refroidissement des baryons conduisant à la formation des nuages interstellaires et des étoiles, mais pas de la matière noire. Comparer modèles et observations requiert donc l'utilisation de modèles physiques complexes pour décrire l'effondrement de gaz en galaxies et étoiles ; là réside la grande difficulté.

Afin de motiver physiquement l'utilisation de ces modèles, les astrophysiciens et cosmologistes s'intéressant à la formation des galaxies doivent rechercher des signatures observationnelles, indépendantes entre elles, afin de mieux cerner le lien entre physique des baryons et matière noire. De nombreuses approches existent et, concernant les baryons, elles utilisent les galaxies comme « particules tests » traceurs naturels des baryons à l'origine des étoiles – traceurs très certainement non linéaires. Des échantillons de galaxies massives sont par exemple utilisés pour mesurer leurs corrélations spatiales et leur évolution, en vue de comprendre la fusion des halos. D'autres traceurs sont utilisés, comme la formation stellaire *via* les galaxies infrarouges (voir *encadré « les galaxies infrarouges »*). Une autre méthode pour étudier la physique de la structuration du gaz de baryons consiste à mesurer l'émission des galaxies, ce qui permet d'une part de quantifier l'énergie rayonnée pour la confronter aux prédictions des modèles, d'autre part d'identifier les familles de processus d'émission dominants par l'étude spectrale.

3. Ceci dans le cadre cosmologique (dit de concordance) qui inclut la présence de matière noire et une constante cosmologique non nulle.



Encadré 1

Les galaxies infrarouges

Notre Galaxie, la Voie Lactée, émet à peu près autant d'énergie dans le domaine visible que dans le domaine infrarouge (longueurs d'ondes supérieures à environ 5 microns). Ce n'est pas le cas de toutes les galaxies. Les galaxies dites infrarouges émettent l'essentiel de leur énergie dans ce domaine spectral. Certaines y émettent plus de 90 % : ce sont les galaxies lumineuses dans l'infrarouge (LIRG) ou ultra-lumineuses (ULIRG). La *figure 2* montre la forme des spectres de galaxies de type ULIRG, de type infrarouge à flambée de formation d'étoile (dit starburst), et de galaxies plus classiques spirales et elliptiques.

Ces distributions spectrales d'énergie des galaxies, ajustées par des modèles, permettent d'en identifier les principaux composants : populations stellaires avec leur âge, présence et nature de la poussière.

Par exemple, la série de pics entre 5 et 15 microns est caractéristique de molécules planes aromatiques (ou hydrocarbures polycycliques aromatiques, ou PAH) présentes dans les zones proches des lieux de formation d'étoile. Le pic au-delà de 60 microns est caractéristique des gros grains de poussière (taille de l'ordre de la centaine de nanomètres), qui absorbent les photons ultraviolets (issus de la formation stellaire ou de l'accrétion), s'échauffent et émettent dans l'infrarouge lointain.

Les galaxies infrarouges peuvent être de différents types morphologiques ; un petit échantillon est présenté en *figure 3*. On remarque que les LIRG à redshift 1 sont souvent des spirales, mais pas uniquement: beaucoup présentent des morphologies perturbées, signes de fusion de galaxies.

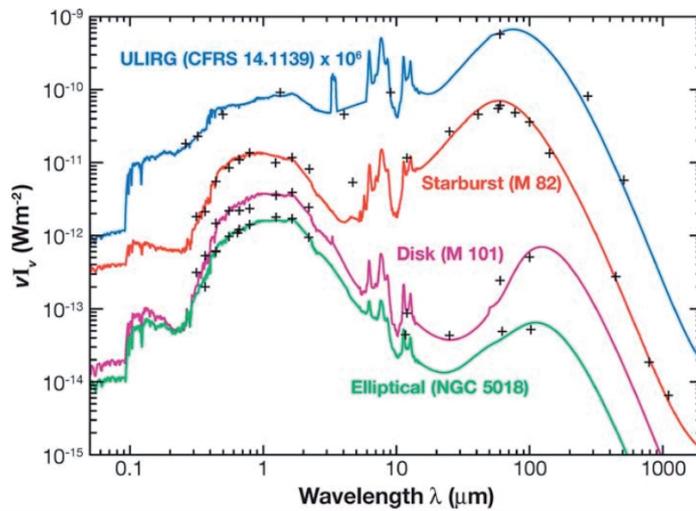


Figure 2 – Distributions spectrales d'énergie de quatre types de galaxies. De haut en bas : galaxie ultra-lumineuse dans l'infrarouge (ULIRG) ; galaxie infrarouge à flambée de formation stellaire (starburst); galaxie spirale proche ; galaxie elliptique. Les galaxies proches de type spiral et elliptique émettent l'essentiel de leur énergie dans le domaine visible (longueurs d'ondes inférieures à 5 microns), contrairement aux ULIRG et starburst qui émettent surtout dans l'infrarouge. D'après F. Galliano (thèse, 2004) cité dans Lagache *et al.* (2005). Reproduit, avec permission, de Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Volume 43 ©2005 by Annual Reviews www.annualreviews.org.

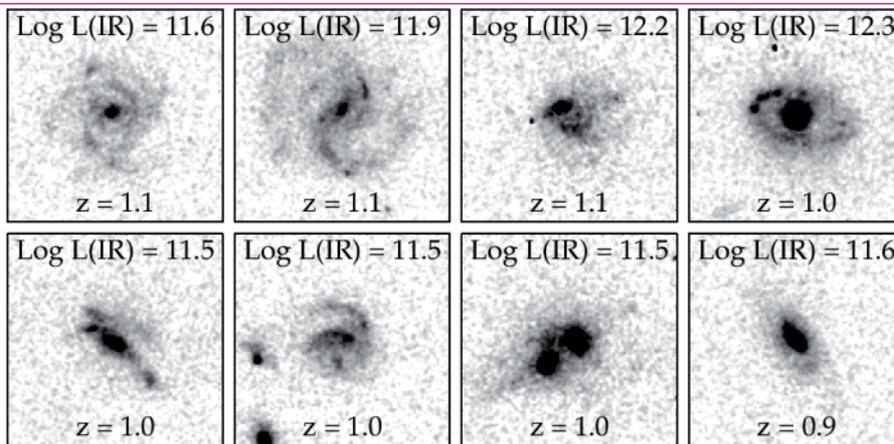


Figure 3 – Exemple de 8 galaxies lumineuses dans l'infrarouge (LIRG) à un redshift de l'ordre de 1, détectées par le satellite Spitzer, et imagedées par le télescope spatial Hubble en bande I à 850 nm. Chaque image a une taille de 5 secondes d'arc de côté. La luminosité infrarouge est indiquée en haut et le redshift en bas. On remarque des morphologies de galaxies perturbées et/ou en interaction, mais aussi de type spirale (en haut à gauche) ou de type elliptique (en bas à droite). Tiré de Papovich *et al.* (2004).



Ainsi, l'étude du spectre de rayonnement des galaxies sur un large domaine de longueur d'onde permet de déterminer quel processus domine entre la formation stellaire (nucléosynthèse, formation des éléments chimiques au cœur des étoiles) et/ou l'accrétion (gravitation), et permet de mesurer la masse stellaire et la quantité de poussières, le taux de formation d'étoiles et la masse d'un éventuel trou noir central. Il est cependant souvent très coûteux en temps et en technologie d'accéder à toute l'étendue du spectre des galaxies (du domaine radio aux rayons gamma), et, quand c'est possible, cela ne concerne qu'un nombre restreint de galaxies, souvent proches ou très lumineuses. Il est alors difficile dans ces conditions de sonder la formation des structures de manière fiable. S'il est compliqué d'étudier les galaxies individuelles en détail, il est néanmoins possible de les étudier en grand nombre dans un domaine spectral restreint, soit en menant une étude statistique sur les galaxies détectées, soit *via* le rayonnement de fond extragalactique diffus.

Le rayonnement de fond des galaxies

Prédit en 1967, ce rayonnement est la somme de toutes les émissions des galaxies de toutes les générations, une émission fossile de leur formation. Il a dès lors été activement recherché, mais n'a été découvert qu'en 1996 par une équipe d'Orsay dans les données du satellite COBE obtenues en 1992, à des longueurs d'ondes comprises entre 200 microns et 1 millimètre (correspondant au domaine de l'infrarouge lointain et du submillimétrique, voir *figure 4*).

Étonnamment, le maximum d'énergie a été mesuré vers 200 microns, alors que les galaxies locales rayonnent l'essentiel de leur énergie dans le domaine visible (voir *encadré « les galaxies infrarouges »*). La présence de ce rayonnement intense dans l'infrarouge, appelé fond extragalactique infrarouge, démontre l'accroissement d'émission infrarouge avec la distance⁴ et témoigne donc de l'évolution des galaxies. Il importe de bien distinguer ici deux effets : le rougissement des rayonnements émis par les objets lointains à cause de l'expansion de l'Univers, et la part plus élevée de l'infrarouge dans l'émission intrinsèque des galaxies par le passé. C'est ce dernier effet qui domine largement et qui est discuté dans cet article. Dans la suite, nous considérerons les rayonnements corrigés des effets de l'expansion, c'est-à-dire considérés dans le référentiel propre de la source.

4. Les cosmologistes utilisent plutôt la notion de décalage Doppler spectral vers le rouge, ou **redshift**, dû à l'expansion de l'Univers. Pour fixer les idées : redshift = 0 correspond à aujourd'hui. Redshift = 1 correspond environ à la moitié de l'âge de l'Univers, soit environ 8 milliards d'années, ce qui correspond à une distance d'environ 21 milliards d'années-lumière ; Redshift = 2 correspond à un quart de l'âge de l'Univers (soit il y a environ 10,3 milliards d'années), et une distance de 51 milliards d'années-lumière.

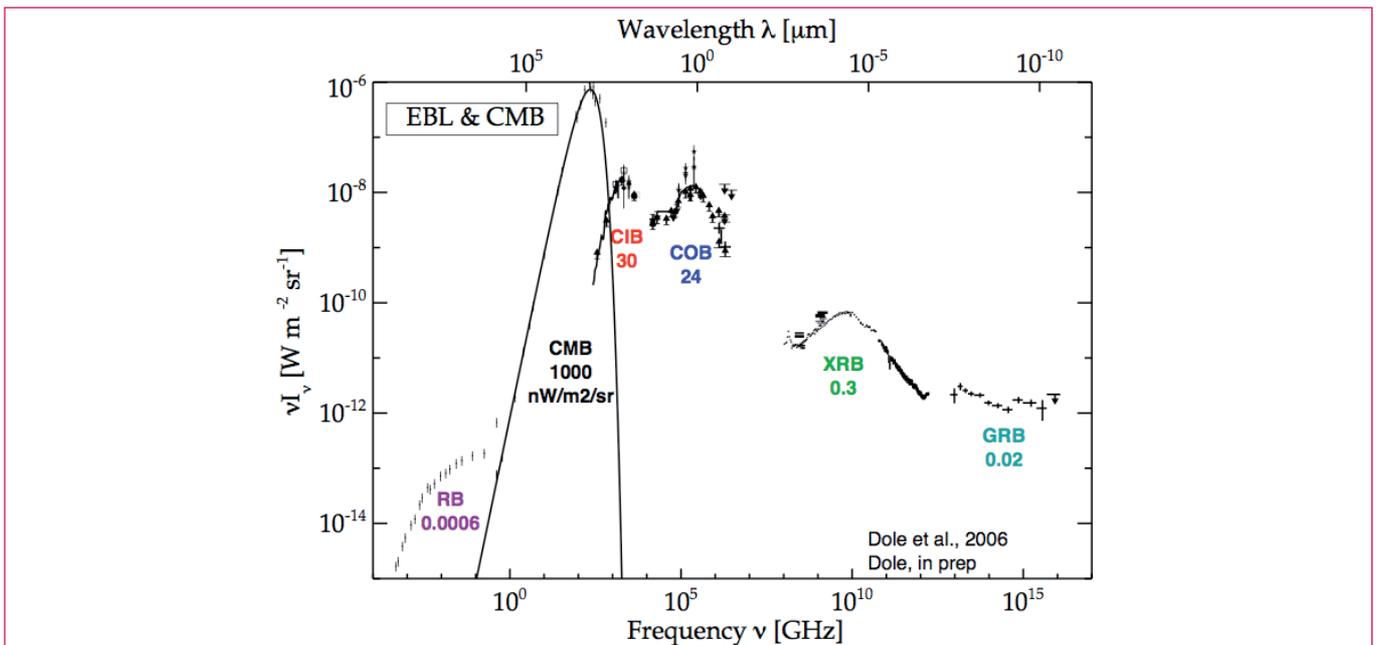


Figure 4 – Distribution spectrale d'énergie des rayonnements diffus dans l'Univers (hors de notre Galaxie), exprimée en puissance par unité de surface et d'angle solide, en fonction de la fréquence (en bas, en GHz) ou de la longueur d'onde (en haut, en microns) sur plus de 20 ordres de grandeur. Les chiffres indiquent la brillance intégrée de chaque rayonnement, en unité de nW/m²/sr. Le rayonnement dominant est le fond cosmologique à 2.7K (noté CMB). Le reste du rayonnement est dû au fond extragalactique s'étendant du domaine radio aux rayons gammas ; son émission est maximale dans l'infrarouge lointain (noté CIB), puis dans le domaine visible (noté COB). Autres fonds : radio (RB), rayons X (XRB), rayons gammas (GRB). Figure : d'après Dole *et al.* (2006).



Il restait à comprendre l'origine de cet excès d'émission, et à identifier les populations de galaxies responsables. Ce n'était pas possible avec COBE dont la résolution angulaire trop faible ne permettait pas de détecter les galaxies individuelles. La tâche est d'autant plus complexe que de nombreux avant-plans contaminent le signal (émissions de notre Système Solaire et de notre Galaxie) et que ce domaine spectral n'est quasiment pas accessible depuis le sol à cause de l'absorption atmosphérique : seuls des ballons, fusées-sondes ou satellites y accèdent avec une sensibilité suffisante. Il fallait donc de nouvelles générations de satellites observant dans l'infrarouge et disposant d'une meilleure résolution angulaire capable de détecter les galaxies. Les satellites européen ISO (lancé en 1995) et américain Spitzer (lancé en 2003), ont ainsi mené des relevés profonds entre 3 et 200 microns de longueur d'onde (voir *encadré « L'apport des satellites »*) qui ont révolutionné notre vision de l'évolution des galaxies, surtout grâce aux observations effectuées dans l'infrarouge moyen, entre 5 et 30 microns de longueur d'onde (avec ISOCAM à bord d'ISO d'abord, puis IRAC et MIPS à bord de Spitzer). La technologie disponible en infrarouge lointain, entre 60 et 200 microns, n'offre cependant pas les mêmes performances, et la taille limitée du télescope (de 60 à 80 cm) conduit à une résolution dégradée des images à grande longueur d'onde (voir *encadré « confusion et empilement »*), rendant encore plus difficile la détection de galaxies. Le fond infrarouge vers 200 microns n'est donc résolu en galaxies individuelles qu'à environ 20%, alors qu'il est résolu à environ 80% en infrarouge moyen. Ces chiffres constituent des ordres de grandeurs, car la valeur absolue de l'intensité du fond n'est pas connue avec une grande précision à ces longueurs d'ondes.

Tirant parti des derniers relevés profonds du satellite Spitzer, qui ont la particularité d'avoir été menés à 7 longueurs d'ondes (entre 3 et 160 microns), notre équipe a

employé une technique originale pour sonder le faible signal du fond extragalactique infrarouge à 70 et 160 microns (voir *encadré « confusion et empilement »*) qui permet de gagner environ un ordre de grandeur en sensibilité. En empilant le signal de près de 20 000 galaxies préalablement détectées à 24 microns, nous arrivons à mesurer la contribution au fond infrarouge de ces galaxies : nous trouvons désormais que 80 % du fond infrarouge à 70 et 160 microns est identifié en galaxies ! (*figure 5*)

Cette technique remarquable⁵ nous permet de donner une valeur inférieure au fond extragalactique extrêmement contraignante pour les modèles, et de confirmer que le maximum d'énergie de ce rayonnement se situe vers 160 microns (*figure 4*). En outre, nous mesurons que ce rayonnement est plus important dans l'infrarouge que dans le visible (environ 30 et 24 nW/m²/sr respectivement). Ainsi, les processus de formation et d'évolution des galaxies ont en moyenne émis 120 photons infrarouges lointains pour 1 photon visible. Comme l'énergie lumineuse émise par les galaxies provient pour environ 3/4 de la formation stellaire (rayonnement UV et visible) et pour environ 1/4 de l'environnement des trous noirs (rayonnement UV, X), le rayonnement extragalactique aurait dû naïvement présenter un maximum dans le visible ou à plus grande énergie. Nous avons confirmé que ce n'est pas le cas. Cela implique un rôle important de la poussière interstellaire dans les galaxies, qui absorbe le rayonnement des étoiles et le rayonnement produit dans l'environnement des trous noirs, pour le réémettre dans l'infrarouge. L'étape suivante consiste à mieux comprendre l'origine des galaxies contribuant au fond infrarouge, tout en essayant de retracer leur histoire.

5. Aussi utilisée dans le domaine radio et des hautes énergies

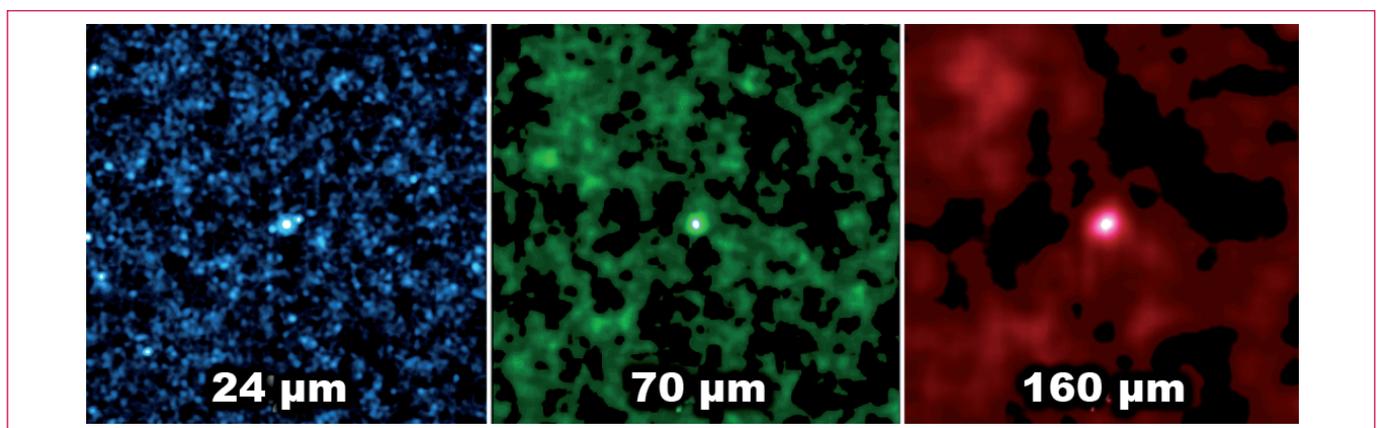


Figure 5 – L'empilement d'environ 20 000 galaxies à 24 (gauche), 70 (milieu) et 160 microns (droite) des données du satellite Spitzer, qui a permis la résolution du fond infrarouge lointain. Le signal attendu est la zone brillante au centre de chaque image. La dimension de cette zone brillante augmente avec la longueur d'onde, puisqu'elle est liée à la diffraction du télescope. Extrait de Dole *et al.* (2006) ; voir aussi Bavouzet *et al.* (2009, in prep).



Encadré 2

Confusion des galaxies et technique d'empilement

La résolution des images provenant des télescopes en orbite dépend de la longueur d'onde, puisque le pouvoir séparateur, limité par la diffraction, est proportionnel à la longueur d'onde d'observation divisée par le diamètre du télescope. Une image prise à 160 microns aura ainsi une résolution environ 50 fois moindre qu'une image à 3 microns prise avec le même télescope. Les images acquises vers 100 ou 200 microns de longueur d'onde subissent donc l'effet de *confusion*, effet qui noie les détails (figure 6). Les galaxies sont ainsi plus difficilement détectables qu'à courte longueur d'onde.

Pour mesurer le flux des galaxies à grande longueur d'onde alors que les données sont limitées par la confusion et qu'en apparence il n'y a pas de signal, nous avons utilisé la technique de l'empilement (figure 7). Il suffit d'additionner le signal d'une distribution de milliers de galaxies non détectées à 160 microns (mais préalablement détectées et localisées sur des images à 24 microns) pour

extraire le flux total de la distribution. Cette méthode permet d'augmenter le rapport signal (flux total des galaxies individuelles) sur bruit (somme des autres fonds) d'un facteur racine de n , n étant le nombre de sources utilisées. Cette méthode ne permet que la mesure de la somme d'un grand échantillon de galaxies (à partir d'une centaine). Il n'est pas possible d'extraire le flux d'une galaxie individuelle.

Illustrons cette technique sur des cas réels : la figure 5 montre le résultat de l'empilement d'environ 20 000 galaxies qui a permis de faire ressortir l'essentiel du fond infrarouge lointain (à 70 et 160 microns). La figure 8 montre l'empilement d'environ 7000 galaxies à 870 microns dans les nouvelles données de la caméra LABOCA du télescope APEX au Chili.

Plus d'informations, images et vidéo sont disponibles sur <http://www.ias.u-psud.fr/irgalaxies/>

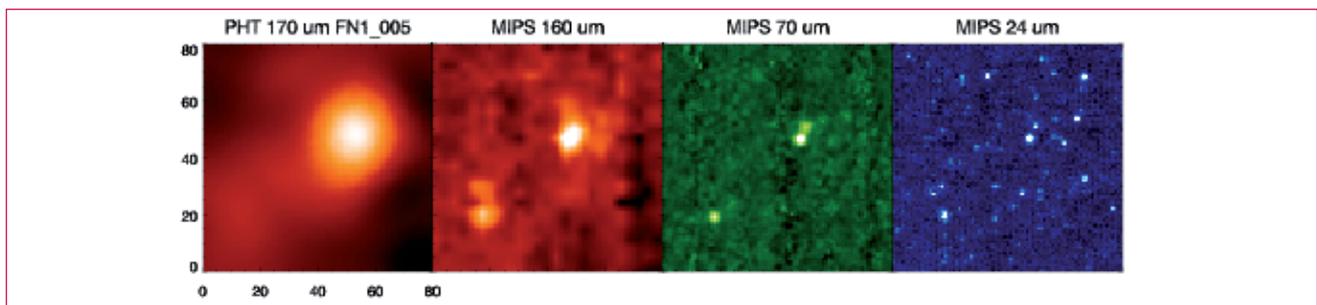


Figure 6 – De gauche à droite : une même région du ciel (environ 40 minutes d'arc carrées) observée en infrarouge par ISO à 170 microns et Spitzer à 160, 70 et 24 microns. Noter l'augmentation du nombre de sources détectées à courte longueur d'onde (vers la droite), en raison de la meilleure résolution angulaire et des propriétés des détecteurs. Image : H. Dole et Lagache *et al.* (2005). Reproduit, avec permission, de Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Volume 43 ©2005 by Annual Reviews www.annualreviews.org.

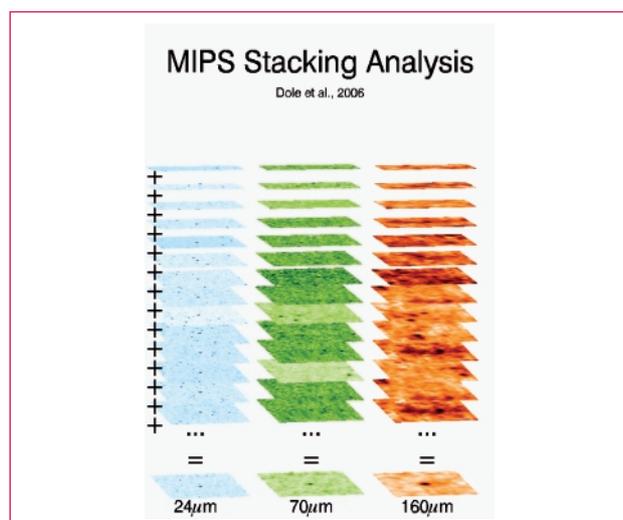


Figure 7 – Illustration de la technique d'empilement (stacking). Les galaxies sont identifiées individuellement à 24 microns (colonne de gauche), alors qu'aucune contrepartie n'est détectée à 70 (milieu) et 160 microns (à droite). Une image est extraite autour de chaque galaxie détectée aux trois longueurs d'ondes. Il suffit d'empiler les milliers d'images pour obtenir le signal total (ligne du bas).

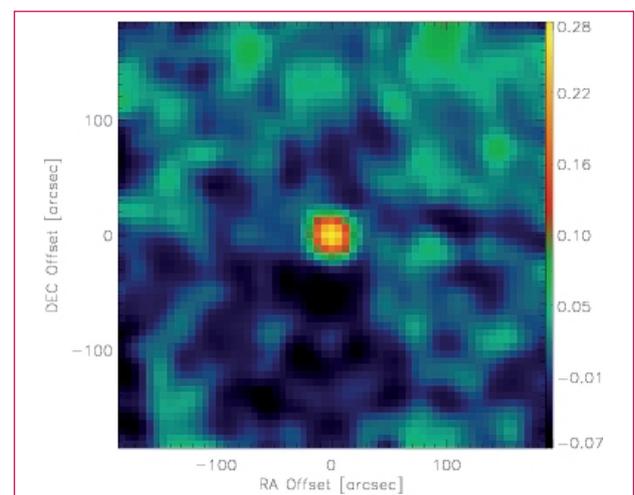


Figure 8 – L'empilement d'environ 7000 galaxies à 870 microns, des données de la caméra bolométrique submillimétrique LABOCA installée au télescope APEX au Chili. Extrait de Beelen *et al.* (2009, en préparation).



Encadré 3

L'apport des satellites : Spitzer, Planck et Herschel

Le domaine infrarouge (1 à 250 microns) et submillimétrique (250 microns à 1mm) ne dispose que d'un nombre limité de fenêtres atmosphériques permettant des observations depuis le sol. Les télescopes refroidis à température cryogénique mis sur orbite constituent la seule solution pour étudier les galaxies faibles. Cependant, les fortes contraintes sur la température du télescope (quelques Kelvins à quelques dizaines de K) et de l'instrumentation (de 0.1K à 4K) ont limité la dimension et la durée de vie des télescopes qui ont volé jusqu'à présent. IRAS (1983) a fonctionné pendant 10 mois et avait un diamètre de 60 cm. Le télescope infrarouge DIRBE sur le satellite COBE (1989) a fonctionné 10 mois et avait un diamètre de 30 cm. Tous deux ont mené des relevés complets du ciel. ISO (1995), le premier observatoire infrarouge, européen, avait un diamètre de 60 cm et a fonctionné 27 mois. Spitzer (2003) est doté d'un télescope de 85 cm et a une durée de vie d'environ 5,5 ans.

Malgré ces contraintes, l'évolution des détecteurs permet de gagner en sensibilité et en pouvoir de résolution, avec un meilleur échantillonnage de la figure de diffraction du télescope. La *figure 9* présente une même région du ciel observée par 3 télescopes diffé-

rents, et montre que la détection de galaxies est plus aisée avec les télescopes récents. Sur ces images, on remarque que les galaxies ne sont pas résolues individuellement avec IRAS, et qu'elles forment un fond diffus fluctuant spatialement (le fond infrarouge). À mesure que la résolution angulaire augmente, les instruments résolvent ce fond diffus en sources discrètes.

La prochaine génération de satellites sera européenne. L'observatoire Herschel, d'un diamètre de 3,50 m, sera le plus grand télescope astronomique jamais lancé (le Hubble ne mesurant « que » 2,40 m), et il observera entre 60 et 600 microns de longueur d'onde avec une résolution angulaire inégalée dans l'espace. Le satellite Planck, d'un diamètre de 1,50 m, observera entre 350 microns et 1 cm de longueur d'onde, avec une sensibilité et une résolution angulaire bien meilleures que ses prédécesseurs COBE et WMAP. La combinaison des données des deux missions permettra d'étudier avec une grande précision la formation et l'évolution des galaxies, au travers de l'étude des galaxies infrarouges et des fluctuations du fond infrarouge.

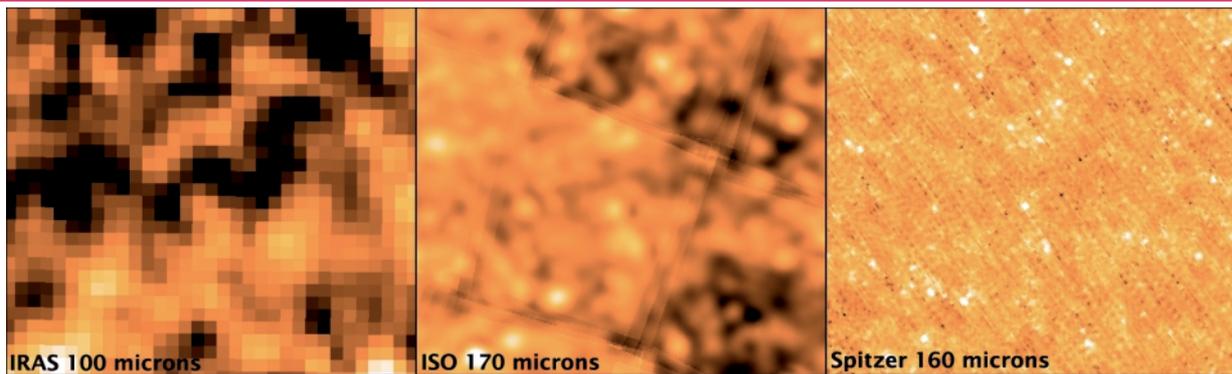


Figure 9 – La même portion du ciel (environ 1 degré carré) observée en infrarouge lointain par trois satellites de générations différentes. De gauche à droite : IRAS à 100 microns (en 1983) ; ISO à 170 microns (en 2000) ; Spitzer à 160 microns (en 2004). La résolution angulaire augmente avec les nouvelles technologies des détecteurs. Image: H. Dole et IRAS, ISO/FIRBACK, Spitzer/SWIRE.

La surprenante histoire des galaxies

L'étude fine du rayonnement de fond extragalactique infrarouge, qui exploite des campagnes de relevés cosmologiques à plusieurs longueurs d'onde – visible et infrarouge proche, mais aussi parfois ultraviolet, rayons X, submillimétrique et radio – et la spectroscopie (*figure 10*), permet d'obtenir l'époque des émissions et les luminosités des galaxies, ainsi que la contribution massique des étoiles et des poussières, celle de l'éventuel trou noir central, le taux de formation stellaire, la température des poussières et une estimation de leurs tailles.

Dans l'Univers local, rares sont les galaxies qui émettent l'essentiel de leur énergie dans l'infrarouge. En effet, l'émission stellaire, prépondérante, présente son maximum dans le domaine visible-UV. Le niveau élevé du fond extragalac-

tique dans l'infrarouge lointain suggère que les galaxies émettaient nettement plus dans l'infrarouge par le passé. La mesure de la densité de luminosité (luminosité par élément de volume d'Univers, corrigée des effets de l'expansion) émise en fonction de la distance, ou redshift (*figure 11*) permet de connaître l'évolution de la formation stellaire avec le redshift. Ainsi, la densité de formation stellaire était-elle maximale à l'époque qui correspond au redshift de 1, et c'est une fonction lentement décroissante avec le redshift aux époques plus lointaines. Le plus intéressant réside dans la cause de cette évolution.

On constate que les galaxies visibles dans l'ultraviolet – parce que leurs étoiles se forment dans des milieux relativement libres de poussières – ont une contribution au taux de formation d'étoiles qui croît lentement lorsque le redshift augmente (*figure 11*). La population galactique qui contri-

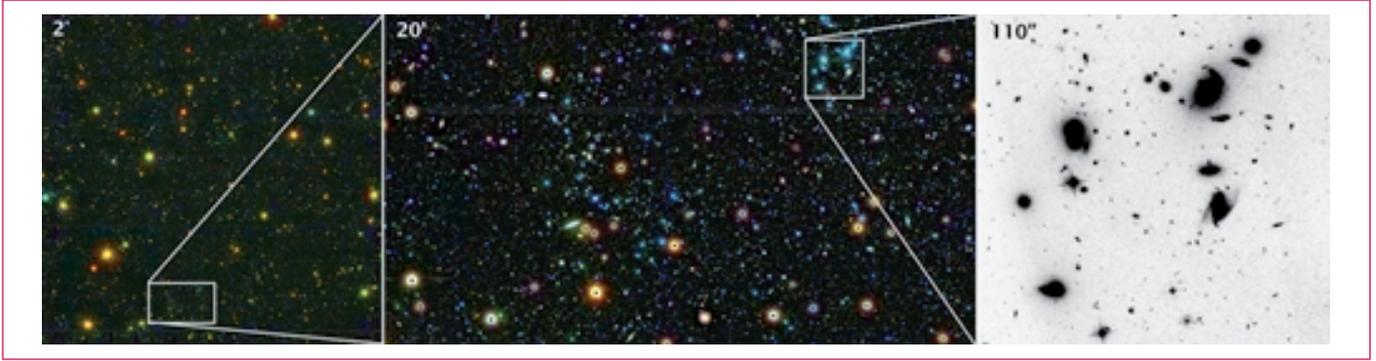


Figure 10 – Exemple de relevé profond dans le domaine visible, avec le champ COSMOS. À gauche : image du télescope au sol SUBARU (prises en bleu, vert et rouge) sur 4 degrés carrés ; au centre : zoom sur 20 minutes d’arc ; à droite : image du télescope spatial Hubble en bande I (dans le rouge), zoom sur environ 2 minutes d’arc. En identifiant les galaxies de ces images avec les données dans l’infrarouge (et parfois avec l’aide d’observations spectroscopiques supplémentaires) il est possible d’estimer le redshift, la luminosité totale et le taux de formation stellaire des galaxies. Image : H. Dole à partir des données publiques COSMOS.

bue le plus au taux de formation stellaire est celle des galaxies lumineuses dans l’infrarouge (Luminous InfraRed Galaxies, ou « LIRG »), avec des luminosités intégrées comprises entre 10^{11} et 10^{12} luminosités solaires⁶ (voir encadré « les galaxies infrarouges »), dont la contribution augmente d’un facteur 10 entre les redshifts 0 et 1 (courbe en tiret vert), c’est-à-dire entre le temps présent et il y a 8 milliards d’années. C’est cette population qui est responsable de l’essentiel du fond infrarouge.

Ainsi s’esquisse la surprenante évolution des galaxies et de leurs contributions au fond extragalactique infrarouge. A

un redshift supérieur à 0,7, l’Univers était dans une phase active infrarouge. Des galaxies lumineuses en infrarouge (LIRG) dominaient le taux de formation stellaire dans l’Univers (vers un redshift de 1). À redshift nettement plus élevé, les ULIRG ultra-lumineuses dans l’infrarouge (plus de 10^{12} luminosités solaires) semblent avoir dominé.

Ainsi, alors que dans l’Univers local l’essentiel des galaxies rayonne dans le domaine visible, le fond infrarouge domine à cause des nombreuses LIRG et ULIRG lointaines qui émettent fortement dans l’infrarouge.

Quelle est la nature physique de ces galaxies LIRG ? Elle est en fait très variée, puisqu’une LIRG a pour seule propriété d’être très lumineuse en infrarouge et d’y émettre quasiment toute son énergie, par l’intermédiaire des pous-

6. Par comparaison, notre Voie Lactée a une luminosité d’environ 3×10^{10} luminosités solaires.

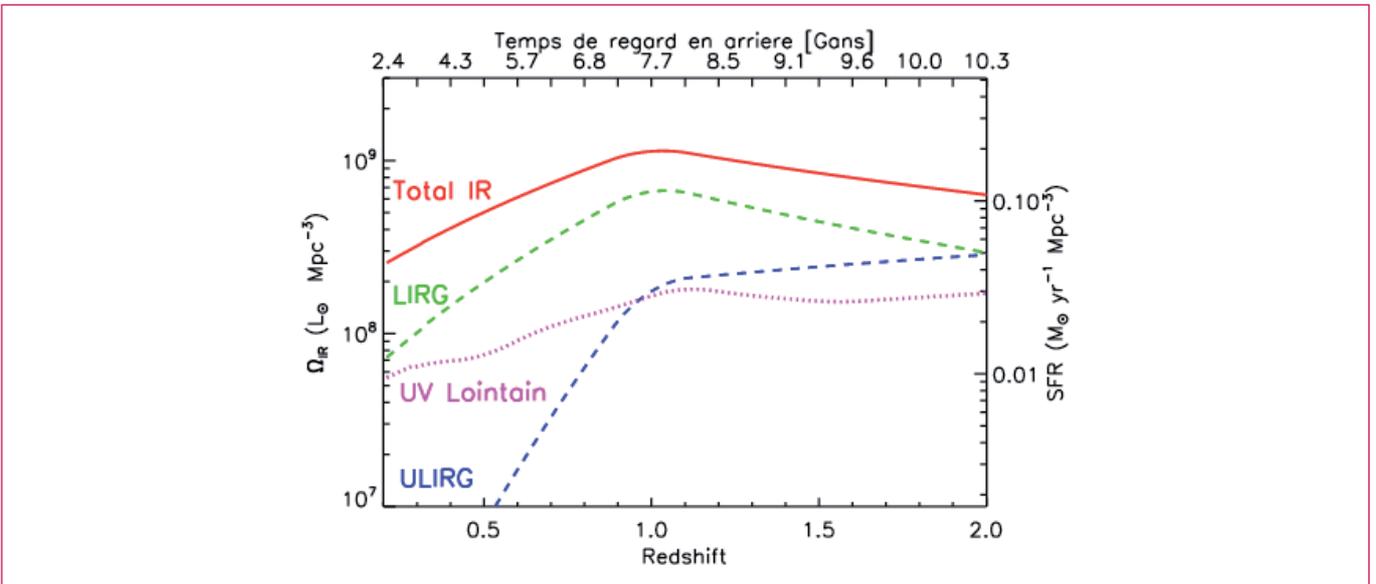


Figure 11 – Densité d’énergie intégrée sur le spectre électromagnétique (en luminosité solaire par mégaparsec cube) en unités comobiles (qui corrigent des effets de l’expansion) émise par les galaxies en fonction de l’époque cosmique (redshift en bas, ou temps de regard en arrière en haut) et par type : en vert les galaxies très lumineuses en infrarouge (LIRG), en bleu les galaxies ultra-lumineuses en infrarouge (ULIRG), en violet les galaxies observées en UV, et en rouge le total. On remarque que les LIRG dominent jusqu’au redshift 2, et qu’un très fort accroissement est observé pour les LIRG et les ULIRG jusqu’à un redshift d’environ 1. Synthèse des travaux de Le Floch *et al.* (2005), Caputi *et al.* (2007), Tresse *et al.* (2007).



sières interstellaires chauffées par l'absorption du rayonnement électromagnétique. Par exemple, une LIRG locale n'a rien de commun avec une LIRG à un redshift de 1 : dans le premier cas, il s'agit souvent de galaxies en interaction forte ou en fusion, avec contribution importante de noyau actif ; dans le second cas (grand redshift), il s'agit souvent d'une galaxie sous forme de disque ou faiblement perturbée (voir encadré « les galaxies infrarouges »). Dans tous les cas, les LIRG sont des galaxies beaucoup plus massives que la moyenne, avec de forts taux de formation stellaire. Les ULIRG (essentiellement formées à un redshift supérieur à 2) sont encore plus massives (10^{11} masses solaires ou plus) et situées au cœur de halos de matière noire massifs (10^{12} masses solaires ou plus). La formation aussi précoce d'objets aussi lourds est actuellement difficilement explicable dans le cadre du modèle de formation hiérarchique des structures décrit précédemment (formation des galaxies). Pour affiner ces modèles, l'étude des galaxies moins lumineuses à grand redshift semble une approche prometteuse. Un moyen original pour obtenir des informations statistiques sur ces objets peu lumineux consiste à étudier les anisotropies dans les fluctuations du fond extragalactique infrarouge.

Les fluctuations du fond infrarouge : un nouvel outil pour dévoiler la structuration des galaxies

Malgré les succès de la technique d'empilement, la confusion constitue une limitation à l'analyse des données

cosmologiques dans l'infrarouge (voir encadré « confusion et empilement »). Cependant, comme cette confusion est due aux nombreuses galaxies plus faibles et lointaines, il est pertinent d'analyser les fluctuations de brillance de l'image infrarouge pour en extraire une information statistique sur la distribution des galaxies. Ainsi les fluctuations du fond infrarouge peuvent nous révéler des informations cruciales sur la manière dont les galaxies s'agrègent entre elles par l'analyse du spectre de puissance angulaire des images.

Nous avons ainsi combiné les données du satellite Spitzer à 160 microns (figure 6 à gauche) avec celles du satellite IRAS à 100 microns pour détecter des regroupements de galaxies infrarouges à un redshift de l'ordre de 1. Nous avons mesuré un spectre de puissance angulaire (figure 12 à droite) qui résulte de l'addition de plusieurs composantes : la poussière froide d'avant-plan de notre Galaxie (appelée cirrus, par analogie avec les nuages terrestres, en vert), une contribution constante des galaxies non résolues individuellement mais relativement brillantes (distribution de Poisson, en bleu clair). Enfin, entre ces deux régimes d'échelles angulaires ($0,03 < k < 0.2 \text{ arcmin}^{-1}$, soit entre 5 et 30 minutes d'arc environ) se trouve le signal recherché : un excès dû aux fluctuations des galaxies lointaines qui se regroupent selon des échelles privilégiées (bleu foncé). Cet effet se remarque sur l'image à 160 microns (figure 6 à gauche), où les fluctuations visibles ne sont pas distribuées uniformément dans l'image, mais bien par « paquets » (même si une partie d'entre eux ont pour origine l'émission d'avant-plan due aux cirrus de notre Galaxie).

En utilisant un modèle d'évolution des galaxies, nous pouvons ensuite mesurer la corrélation spatiale des galaxies

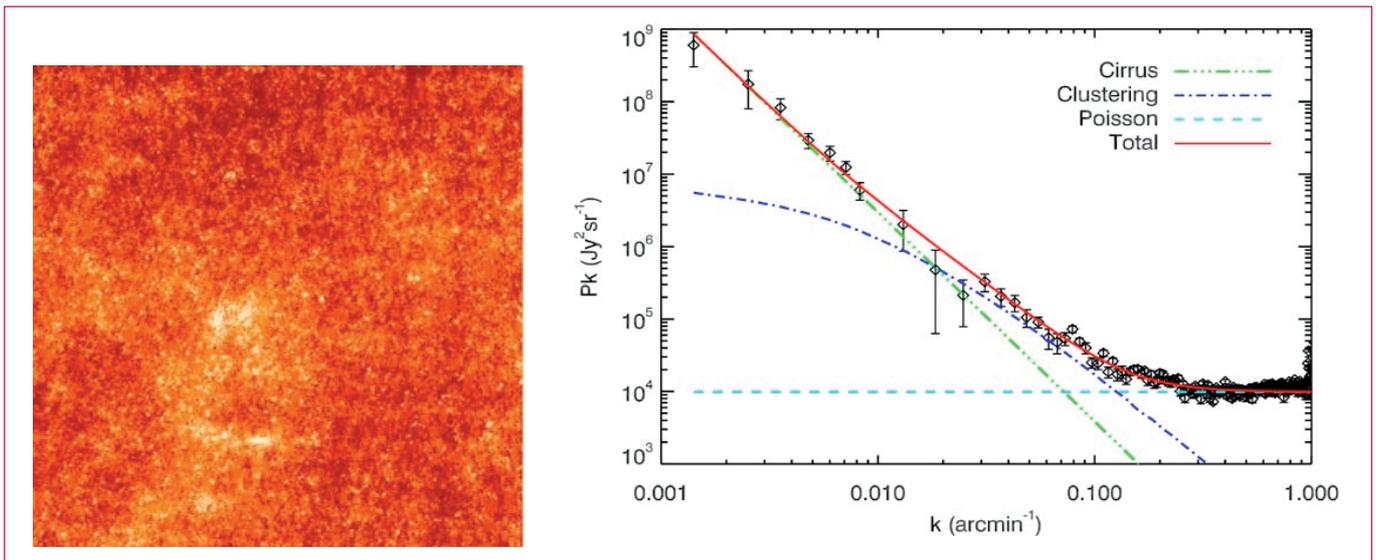


Figure 12 – À gauche : image du ciel à 160 microns vue par le satellite Spitzer, sur environ 4 degrés carrés ; les sources brillantes ont été soustraites, et les fluctuations du fond infrarouge sont bien visibles, et distribuées non uniformément. À droite : Spectre de puissance angulaire (ou analyse en fréquence spatiale du signal) de l'image de gauche. Les grandes échelles angulaires se trouvent à gauche (petit k), et les petites à droite (grand k). La courbe rouge est le spectre de puissance total. En vert : les cirrus d'avant-plan de notre Galaxie ; en tiret bleu clair : composante poissonnienne des fluctuations (absence de corrélation). En trait-point bleu foncé : anisotropies corrélées du fond infrarouge. Figures extraites de Lagache *et al.* (2007).



avec les halos de matière noire. Nous en déduisons que les galaxies lumineuses dans l'infrarouge à un redshift autour de 1 résident dans des halos de matière noire d'environ 10^{12} masses solaires. Cette corrélation s'avère trois fois plus élevée que pour les galaxies infrarouges dans l'Univers proche.

La découverte de cette corrélation des galaxies infrarouges entre elles (et avec la distribution de matière noire) à partir des fluctuations du rayonnement de fond extragalactique nous permet d'espérer pouvoir tracer l'évolution du regroupement des galaxies infrarouges jusqu'à grand redshift, grâce aux données des satellites Planck et Herschel (voir *encadré « L'apport des satellites »*). Pour cela, de nouvelles techniques d'analyse du signal sont en cours de développement : l'empilement et la séparation des composantes.

En conclusion, les avancées sur le rayonnement fossile des galaxies proviennent (et proviendront) surtout des progrès technologiques des télescopes spatiaux, mais aussi des techniques d'analyse du signal astrophysique et de la manière de penser et de manipuler les grandes quantités de données multi-longueur d'onde.

POUR EN SAVOIR PLUS

- Puget *et al.*, 1996, *Astronomy & Astrophysics*, 308, L5.
Elbaz & Cesarsky, 2003, *Science*, 300, 270.
Lagache, Puget, Dole, 2005, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, 43, 727.
Dole *et al.*, 2006, *Astronomy & Astrophysics*, 451, 417.
Lagache *et al.*, 2007, *Astrophysical Journal*, 665, 89.
Livre : *Cosmologie*, de F. Bernardeau, 2007, CNRS Éditions / EDP Sciences.
Livre : *L'observation en astronomie*, de Léna, Dole, Lagrange, Rouan, Binétruy, Génova, février 2009, Ellipses.
Livre : *Galaxies et cosmologie*, de Combes, Haywood, Collin, Mellier, Durret, Guiderdoni, février 2009, Ellipses.
Livre : *Extragalactic Astronomy and Cosmology*, de P. Schneider, 2006, Springer.
Hauser & Dwek, 2001, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, 37, 249.
Caputi *et al.*, 2007, *Astrophysical Journal*, 660, 97.
Fernandez-Conde *et al.*, 2008, *Astronomy & Astrophysics*, 481, 885.
Livre : *L'observation en Astrophysique*, de P. Léna, D. Rouan *et al.*, 2008, CNRS Editions / EDP Sciences.