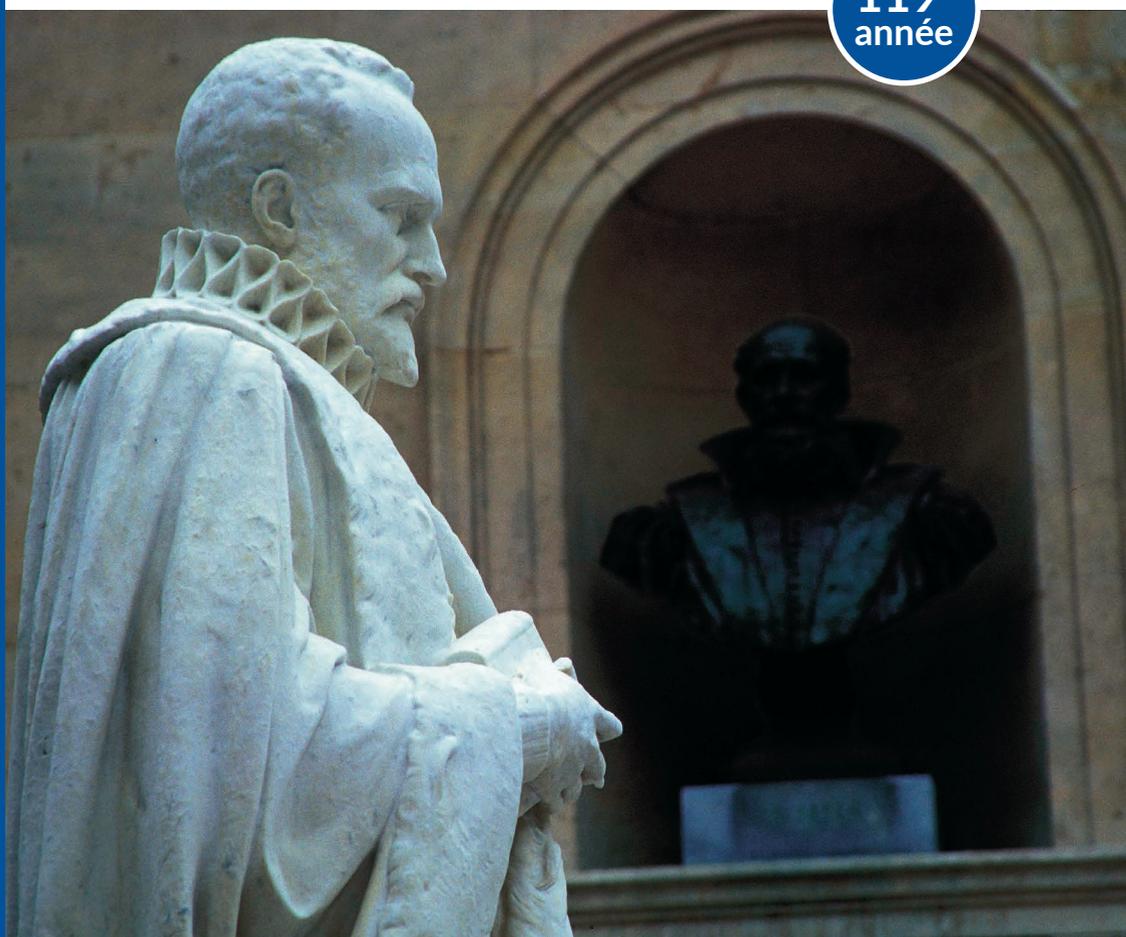


ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2018 - 2019

Résumé des cours et travaux

119^e
année



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

GALAXIES ET COSMOLOGIE

Françoise COMBES

Membre de l'Institut (Académie des sciences),
professeure au Collège de France

Mots-clés : galaxies, Univers, cosmologie

La série de cours et séminaires « Amas de galaxies et grandes structures de l'Univers » est disponible en audio et/ou en vidéo, sur le site internet du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/site/francoise-combes/course-2018-2019.htm>).

ENSEIGNEMENT

COURS ET SÉMINAIRES – AMAS DE GALAXIES ET GRANDES STRUCTURES
DE L'UNIVERS

Introduction

Ces dernières années ont été très riches dans la découverte de notre Univers, la cartographie des galaxies et des grandes structures, par la détermination des décalages vers le rouge (*redshifts*) de millions d'objets. Notre groupe local fait partie d'un super-amas de galaxies, Laniakea, qui contient l'amas de galaxies de Virgo avec d'autres amas. Les amas de galaxies sont un des outils qui permettent de mieux contraindre la matière noire et la nature de l'énergie noire. Pour cela, des *surveys* encore plus gigantesques sont en préparation, avec le satellite Euclid, mais aussi au sol avec le LSST par exemple. Les divers outils utilisés sont les lentilles gravitationnelles, fortes ou faibles, l'utilisation des BAO (*Baryonic Acoustic Oscillations*) comme règle standard, les distorsions *redshift*-espace, le taux de croissance des amas au cours du temps de Hubble. L'étude des amas permet aussi de

déterminer la formation et l'évolution des galaxies, et leur taux de formation d'étoiles, qui est très déprimé dans les amas. On peut détecter de plus en plus d'amas lointains, grâce aux rayons X, et à l'effet Sunyaev-Zeldovich en millimétrique. Les collisions entre amas sont fréquentes, et tracées par des reliques radio, vestiges de populations d'électrons relativistes provenant des AGN, et ré-accélérés par des chocs. Les simulations numériques de formation des grandes structures et de la croissance des amas aident à interpréter les observations.

Cours 1 – Observations des grandes structures

Séminaire 1 – Structures dans le Sloan

Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE (CEA, Saclay), le lundi 19 novembre 2018

Les grandes structures de l'Univers sont essentiellement faites de matière noire invisible, mais les galaxies y sont associées et nous servent de traceur. La cartographie de l'Univers à trois dimensions (la 3^e dimension, la profondeur, est donnée par les vitesses, compte tenu de l'expansion de l'Univers) s'est beaucoup accélérée ces dernières années. Nos connaissances s'accroissent exponentiellement. Alors qu'au début du XX^e siècle, jusqu'en 1920, les astronomes se demandaient s'il existait des galaxies, des mondes à part, extérieurs à la Voie lactée, l'expansion de l'Univers a été établie vers 1930, et peu à peu des cartographies de galaxies en filaments ont été obtenues. Le *survey* du CfA-2 effectué de 1985 à 1995 a obtenu 18 000 spectres de galaxies en dix ans. Puis il a été détrôné par le Sloan SDSS, avec un million de spectres de galaxies, et cela continue ! Le progrès vient des plus grandes performances des télescopes, mais surtout du multiplex, par fibres ou lentilles, qui permet de faire 400 à 1 000 spectres simultanément. Ces grands *surveys* sur des télescopes dédiés ont permis de mettre en évidence de plus grandes structures encore, comme le Grand mur SDSS de 1 370 Mpc de taille ! Les grands *surveys* accumulent tout aussi bien les étoiles de la Voie lactée, les galaxies locales, et les 300 milliards de galaxies visibles jusqu'à notre horizon, les quasars à grand *redshift*, etc. À grand *z*, ce sont les *surveys* profonds du Hubble Space Telescope (HST) qui ont permis de mieux connaître l'Univers lointain et la formation des galaxies. Pour les galaxies proches, où les vitesses particulières dominent sur l'expansion de l'Univers, il a fallu se servir d'un indicateur de distance indépendant de l'expansion (Céphéides, loi de Tully-Fisher, etc.) pour mettre en évidence que nous faisons partie d'un super-amas local, Laniakea, qui contient plusieurs amas de galaxies, comme Virgo. Les filaments cosmiques contiennent aussi beaucoup de gaz difficile à observer, ou bien par absorption devant les quasars lointains. Le gaz ionisé se recombine en émettant la raie Lyman-alpha, soit parce qu'il est excité par des formations d'étoiles, soit par fluorescence de la lumière des quasars. Observer de plus en plus de galaxies (des milliards de galaxies avec le satellite Euclid) va permettre, grâce à plusieurs outils (lentilles gravitationnelles, ondes acoustiques baryoniques, RSD *redshift-space distortions*, etc.) de tester la nature de l'énergie noire, en déterminant son évolution avec le temps, depuis le Big Bang.

Cours 2 – Théorie des grandes structures

Séminaire 2 – Simulations cosmologiques

Yohan DUBOIS (IAP, Paris), le lundi 26 novembre 2018

Comment se sont formées les grandes structures, à partir d'un état initial de l'Univers parfaitement homogène, ne possédant à $z = 1\,000$ (dernière surface de diffusion du fond de rayonnement cosmologique) que des fluctuations d'amplitude relative 10^{-5} ? On peut montrer que, dans un univers en expansion, une fluctuation de densité ne peut croître par sa propre gravité que proportionnellement à la taille caractéristique de l'Univers, soit comme $1/(1+z)$. Ainsi à partir de $z = 1\,000$ les fluctuations ne pourraient atteindre aujourd'hui qu'une amplitude de 10^{-2} , donc toujours pas non linéaire. Si l'on veut expliquer l'existence de galaxies aujourd'hui, il faut absolument disposer de matière noire exotique, qui n'interagit pas avec les photons. Cette matière peut alors s'effondrer sous l'effet de son auto-gravité bien avant $z = 1\,000$, et former des puits de potentiel, ou « galaxies noires », dans lesquels les baryons à partir de $z = 1\,000$ vont tomber pour former des étoiles. Le spectre de puissance de ces structures peut être calculé et correspond bien à un spectre initial indépendant d'échelle (attendu dans les théories d'inflation, à l'origine des fluctuations primordiales). Le spectre observé vient d'une modification, d'un retournement (ou « tilt ») dû au fait que certaines échelles ne pouvaient pas se développer, étant plus petites que l'horizon, dans la période dominée par le rayonnement. Les photons empêchent ces structures de s'effondrer, car ils se déplacent à la vitesse c . Lorsque le rayonnement est dilué par l'expansion, et que la matière domine, ces structures peuvent alors se développer. Il est possible de calculer analytiquement le développement de ces structures, tant qu'elles ne sont pas très non linéaires (formalisme de Press-Schechter). Puis, les simulations cosmologiques sont nécessaires. Celles-ci ont beaucoup de succès à grande échelle, tant que la physique des baryons ne joue pas un grand rôle. À l'échelle des galaxies, l'accord avec les observations n'est pas bon, il faut alors prendre en compte les phénomènes de *feedback*, dus à la formation d'étoiles et aux noyaux actifs, pour rendre compte de la taille des galaxies (toujours trop grandes dans les simulations).

Cours 3 – Les amas de galaxies

Séminaire 3 – Observations des amas

Florence DURRET (IAP, Paris), le lundi 3 décembre 2018

Les amas de galaxies contiennent de 100 à 1 000 galaxies massives, liées gravitationnellement. Leur taille est de plusieurs Mpc. Toutefois, ils ne représentent pas une grande fraction de la masse de l'Univers. La plupart des galaxies sont dans les groupes (moins de 100 galaxies), dont la masse est bien inférieure à 10^{14} Mo – les amas riches pesant de 10^{14} à 10^{15} Mo. Il existe aussi des groupes compacts, de 4 ou 5 galaxies, qui ne devraient pas subsister, car ils sont proches de la fusion, en une échelle courte de temps. Hickson a pu identifier une centaine d'entre eux. Les solutions à cette énigme sont discutées. Les amas de galaxies possèdent un milieu intergalactique chaud, qui peut représenter 10 fois plus de masse que toutes les galaxies réunies, comme dans Coma. Parfois, on peut détecter aussi un peu de gaz

chaud dans les groupes. Les interactions entre galaxies éjectent par les queues de marée beaucoup d'étoiles dans le milieu intergalactique. Les galaxies centrales d'amas sont bien plus grosses et massives, elles sont cannibales, et coalescent avec beaucoup de galaxies à proximité. Il est fréquent d'y voir plusieurs noyaux. Il existe fréquemment des filaments de gaz ionisé, détectés en Halpha. Cela révèle le refroidissement du gaz. Dans ces amas à cœur froid, des instabilités thermiques rendent le gaz instable, ce qui forme des inhomogénéités de façon chaotique, et ces régions denses se refroidissent plus vite. Il peut se former du gaz moléculaire froid, qui perd le support de pression, et coule vers le centre. À l'interface entre le gaz moléculaire et le gaz chaud intra-amas se produit des émissions de Halpha. Le prototype des amas à flots de refroidissement est l'amas de Persée, où quelques 10^{10} Mo de gaz moléculaire ont pu être détectés. Pour tracer la matière noire dans les amas, des campagnes d'observation des lentilles gravitationnelles ont permis une cartographie précise de toute la masse. Apparemment, dans les amas, les halos individuels autour de chaque galaxie seraient tronqués. Les halos seraient mis en commun. Comment détecter les amas à grand *redshift* ? Les méthodes par rayons X et par l'observation de l'effet Sunyaev-Zeldovich sont comparées.

Cours 4 – Le gaz chaud intra-amas

Séminaire 4 – Les *surveys* en rayons X

Monique ARNAUD (CEA-Saclay), le lundi 10 décembre 2018

Les amas de galaxies sont les plus grandes structures virialisées de l'Univers. Ils sont un outil cosmologique précieux. Leur taux de formation à chaque époque va permettre de tester les modèles de gravité modifiée. Par lentilles gravitationnelles, ils vont poser des contraintes sur la distribution de matière noire. Dans les premiers temps, les amas étaient découverts en optique, mais cela demande d'obtenir un grand nombre de spectres de galaxies, et il y a beaucoup de contamination d'avant-plan. La méthode de détection du gaz chaud en rayons X n'a pas de contamination. L'observation de l'effet Sunyaev-Zeldovich en millimétrique en principe ne dépend pas du *redshift*. En pratique, les amas sont de moins en moins massifs avec z , et plus difficilement détectables. Une étude statistique sur 3 000 amas a pu déterminer leurs formes caractéristiques : il s'agit de sphéroïdes de révolution (en première approximation) de forme oblate ou prolate. Comme pour les galaxies elliptiques, ces formes proviennent de fusions entre amas, et sont maintenues par une dispersion anisotrope des vitesses. Le profil de matière noire correspond bien à un profil NFW (contrairement aux galaxies). Dans une première étape, on peut faire l'approximation d'un amas homogène, et proposer un profil beta (densité en puissance $-3/2$ β). Les modèles sont d'autant plus réguliers qu'ils sont déterminés par « *stacking* » ou empilage de tous les amas de même masse entre eux. La lumière et la matière noire ont des distributions radiales semblables. Il existe des relations d'échelle très utiles entre masses, luminosités et températures, en fonction du *redshift*. Les simulations arrivent à bien reproduire les observations. La fraction de baryons observée tend vers la fraction universelle pour les amas les plus massifs. Les parties internes des amas sont relaxées, c'est donc dans les parties externes que l'on recherche aujourd'hui les traces de la formation des amas : effondrement des coquilles, *splashback*. Ainsi, le taux de croissance des amas sera confronté aux modèles de gravité modifiée.

Cours 5 – Physique des amas de galaxies

Séminaire – Effet Sunyaev-Zeldovich

Nabila AGHANIM (IAS, Orsay), le lundi 17 décembre 2018

Le gaz chaud des amas est un plasma très utile : il contient une part significative des baryons, et sa structure thermique est la trace fossile de la formation de l'amas. Il existe un plancher d'entropie, qui provient de l'énergie non gravitationnelle déployée par les supernovae, les noyaux actifs, lors de la vie de l'amas. Les rayons X fournissent aussi un spectre de raies qui permettent de déterminer l'abondance des éléments lourds (fer). L'hydrodynamique du gaz donne la distribution de la matière noire, de par l'équilibre atteint. Plus de la moitié des amas sont des systèmes relaxés, à cœur froid. Le gaz ne se refroidit pas au centre de l'amas, comme on aurait pu le penser, d'après la plus grande densité. Mais la rétroaction du noyau actif le réchauffe au centre, et les jets radio de l'AGN creusent des cavités dans le gaz très chaud. Ces bulles montent par la poussée d'Archimède, et le gaz se refroidit finalement aux bords des cavités, à ~ 20 kpc du centre.

Le problème des flots de refroidissement, gaz froid qui était attendu pour former des étoiles, et qui n'a pas encore été observé, est en passe d'être résolu. Le gaz se refroidit bien, mais 10 fois moins que prévu, à cause des phénomènes de rétroaction de l'AGN central.

D'autre part, les amas subissent sans cesse des collisions, des interactions avec d'autres groupes/amas. Leurs formes extérieures sont souvent celles de bras spiraux, ou lobe spiral. En plus de l'énergie interne due au *feedback* de l'AGN et du bouillonnement des cocons radio, le gaz chaud est brassé sans cesse, la métallicité peut être grande aux bords. Le gaz se refroidit par instabilité thermique, dès que le temps de refroidissement est égal à 10 fois le temps de chute libre. Du gaz moléculaire froid peut ainsi contenir des métaux et se voir en monoxyde de carbone CO. Dans l'amas de Persée, des quantités substantielles de gaz moléculaire (10^{10} Mo) ont été détectées, de même que de la poussière chauffée (rayonnement infrarouge lointain détecté par Herschel).

Cours 6 – Physique des galaxies dans les amas et filaments

Séminaire – Le squelette cosmique

Sandrine CODIS (IAP, Paris), le lundi 7 janvier 2019

Il est établi depuis longtemps que la morphologie des galaxies est différente dans les amas : domination des galaxies elliptiques ou lenticulaires, alors que, dans le champ, les spirales dominent. Il s'avère que cette observation est due à une transformation des spirales en lenticulaires, acquise dans le balayage de leur gaz par pression dynamique (lors de leur entrée dans le gaz chaud à grande vitesse), et non pas à un effet inné, où les galaxies seraient formées avec des morphologies différentes dans les surdensités de l'Univers. Les elliptiques se forment par fusion de spirales, peut-être pas complètement dans l'amas cependant, où les vitesses relatives sont trop élevées, mais dans des groupes, où elles sont pré-processées. Les groupes fusionnent ensuite dans un amas et les galaxies elliptiques se retrouvent à dominer le centre de l'amas.

Les grands *surveys* de galaxies comme le Sloan ont mis en évidence deux séquences de galaxies, la séquence rouge de galaxies quiescentes, ne formant plus d'étoiles « *red and dead* », puis les galaxies bleues, en générale spirales ou irrégulières, encore actives. La séparation assez nette entre ces deux composantes suggère que la formation d'étoiles s'arrête brutalement, on parle de « *quenching* ». Statistiquement, le *quenching* est dû d'abord aux effets d'environnement, puis aussi à la masse des galaxies. Les effets d'environnement sont, en plus du balayage du gaz par pression dynamique, le harcèlement et les nombreuses interactions rapides, de même que l'étouffement, car il n'y a plus de gaz froid pour ravitailler les galaxies dans les amas, comme dans le champ et les filaments cosmiques. Les simulations numériques ont pu quantifier tous ces effets et ont montré comment les filaments cosmiques pouvaient aussi contribuer au *pre-processing* des galaxies, avant qu'elles ne tombent dans l'amas.

Cours 7 – Collisions d'amas, fusion de structures

Séminaire – Simulations de la formation

Dominique AUBERT (Obs, Strasbourg), le lundi 14 janvier 2019

Les collisions entre amas sont fréquentes, elles donnent lieu à des émissions radio reliques, qui peuvent être spectaculaires. En plus du gaz très chaud en équilibre du Viriel (plasma thermique), il existe un plasma non thermique, provenant des jets radio des noyaux actifs. Ces jets émettent de l'émission synchrotron, qui est celle des électrons relativistes dans un champ magnétique. Les électrons sont émis dans le jet avec une distribution en énergie $N(E)$ en loi de puissance. Les électrons les plus énergétiques perdent leur énergie plus vite, et le spectre devient plus pentu. De même, le spectre de l'émission synchrotron est une loi de puissance qui devient de plus en plus pentue avec l'âge du jet. Au bout d'un certain temps assez court (quelques dizaines de millions d'années), le jet devient invisible. Lorsqu'il y a des ondes de chocs, produites par des collisions entre amas, les électrons relativistes sont accélérés par le choc, et même plusieurs fois : un électron piégé dans un miroir magnétique peut aller et venir et traverser des milliers de fois le choc, ce qui lui redonne une énergie très élevée. C'est ainsi que l'on peut voir des radio halos et des reliques radio.

Les reliques sont souvent situées en bord d'amas, et parfois symétriques de chaque côté. Elles peuvent avoir une taille impressionnante, comparable au diamètre de l'amas lui-même. Le long du choc en forme d'arc, il est possible de voir un gradient de la pente du spectre de puissance, montrant que les électrons ont d'abord été accélérés de l'intérieur de l'arc, puis l'accélération se propage vers le bord (moins pentu). La polarisation du rayonnement montre la direction du champ magnétique, parallèle à l'arc. En accompagnement de l'émission synchrotron, il y a des rayons X qui proviennent du processus Compton inverse, des électrons relativistes donnent de l'énergie à des photons de basse fréquence, qui deviennent des rayons X. Le rapport des puissances $P_{\text{synchrotron}}/P_{\text{compton}}$ donne alors une valeur pour le rapport Énergie magnétique/Énergie dans les photons. Le champ magnétique au centre des amas est de l'ordre de 10 micro-gauss. Outre les ondes de choc, il existe aussi des fronts froids, qui peuvent renseigner sur l'histoire des collisions de l'amas.

Cours 8 – Diagnostics cosmologiques

Séminaire – Les fonds cosmiques

Hervé DOLE (IAS, Orsay), le lundi 21 janvier 2019

Les amas de galaxies et les grandes structures fournissent des tests et des diagnostics pour tenter de résoudre les grandes questions qui se posent en cosmologie. En premier lieu, quelle est la nature de la matière noire, quelle est sa distribution par rapport à la masse visible, notamment quel est le biais en fonction du *redshift* (biais = 1 si les baryons et la matière noire ont la même distribution, le même contraste). La nature de l'énergie noire pourrait être éclaircie par la connaissance de la loi de l'expansion de l'Univers en fonction du temps. Pour cela, il faut des règles standard, comme les BAO (*Baryonic Acoustic Oscillations*), mesurer le cisaillement cosmique (lentilles gravitationnelles faibles), et déterminer les distorsions *redshift*-espace. La croissance des amas en fonction du temps donnera des contraintes sur la gravité modifiée. En effectuant toutes ces observations, nous apprendrons aussi comment les baryons s'assemblent dans les structures, quel est le rôle de l'environnement, des groupes et amas dans la formation et l'évolution des galaxies. Les observations actuelles, qui cumulent tous ces diagnostics avec ceux fournis par le fonds cosmologique (satellite Planck) font apparaître un bon accord avec le modèle standard LCDM, mais avec quelques tensions : notamment la valeur de la constante de Hubble, donc la valeur 67 km/s/Mpc est privilégiée par Planck, alors que la mesure directe donne plutôt 74 km/s/Mpc, l'amplitude des fluctuations de densité σ_8 , qui est prédite trop grande par le CMB (Planck). La tension sur la constante de Hubble pourrait être résolue par la variation d'un autre paramètre, par exemple la masse des neutrinos. Dans tous les cas, cette tension est intéressante, car elle indique les directions pour modifier le modèle standard. La mesure du *redshift* gravitationnel serait un test indépendant de la cosmologie.

Cours 9 – Lentilles gravitationnelles

Séminaire – Cisaillement cosmique

Raphael GAVAZZI (IAP, Paris), le lundi 28 janvier 2019

Les lentilles gravitationnelles faibles, ou cisaillement cosmique, sont un outil très précieux pour obtenir la distribution de masse dans les halos, la masse totale et le biais entre matière noire et matière visible. Il est possible aussi d'observer les effets de lentille, donc le cisaillement, sur le fonds cosmologique. La déviation des rayons lumineux de ce fonds vestige du Big Bang apporte des diagnostics sur l'énergie noire et la gravité modifiée. Les amas nous servent aussi de télescopes gravitationnels et permettent de déterminer la physique des galaxies à grand *redshift*, impossible sans amplification. Plus la sensibilité et la résolution spatiale augmentent, plus nous avons de détails sur les lignes critiques du plan image (où le facteur de magnification tend vers l'infini), ou les caustiques, équivalentes dans le plan source. Tout près, le phénomène de lentille forte produit un nombre impair d'images, de chaque côté de la caustique, elles seront les symétriques dans un miroir (changement de parité), cela permet de les reconnaître dans la confusion.

Les déflexions des photons du fonds cosmologique peuvent être calculées statistiquement, il y a en moyenne de l'ordre de 50 déflexions pour une taille de

lentille de 300 Mpc. Une marche au hasard va donner une déflexion finale de 2 arcmin. Le cisaillement va dominer les structures à petite échelle. Sur le pic acoustique principal (1°), 2 arcmin correspond à 3 % de distorsion. Cette distorsion introduit aussi une polarisation du rayonnement, qu'il est important de prendre en compte pour mieux déterminer la polarisation initiale, traceur des ondes gravitationnelles primordiales (preuves de l'inflation). En effet, la polarisation ajoutée par le cisaillement est de type B (type rotationnel), justement traceur des ondes primordiales. Notons que l'effet ISW (*Integrated Sachs-Wolf*) dans le fonds cosmique dû aux grandes structures et à l'énergie noire, a été détecté en corrélation avec les cartes du Sloan. Il existe aussi une bonne corrélation des déflexions avec le fond infrarouge (par *stacking*).

Enfin, en se servant des amas comme télescopes gravitationnels, il a été possible d'étudier le gaz moléculaire et la physique des nuages à grand z , et de montrer qu'il y avait une chute du nombre de galaxies massives à $z = 8$. Leur étude devra attendre le JWST.

RECHERCHE

Durant cette année académique 2018-2019, notre équipe a travaillé sur un certain nombre d'observations à haute résolution spatiale obtenues avec l'interféromètre ALMA : notamment détection pour la première fois de tores moléculaires, prévus depuis longue date dans le paradigme des noyaux actifs de galaxies (Combes *et al.*, 2019). Nous avons pu, sur une dizaine de noyaux actifs de faible luminosité, calculer dynamiquement, avec la vitesse de rotation du gaz moléculaire, la masse des trous noirs centraux. Nous avons aussi détecté des flots moléculaires, notamment dans la galaxie NGC 613 (Audibert *et al.*, 2019), qui révèle aussi l'évidence de chute du gaz pour alimenter le trou noir. Dans des objets très compacts et très obscurcis par la poussière, le meilleur traceur du gaz dense est HCN, et surtout les raies vibrationnellement excitées, qui sont plus optiquement minces, et parviennent à sortir (Aalto *et al.*, 2019).

L'absorption moléculaire devant les quasars lointains et très rare, nous ne connaissons que six systèmes dans tout le ciel, en ce qui concerne les distances cosmologiques. Pourtant, cette technique est très complémentaire de l'émission et permet de sonder les propriétés physiques du milieu interstellaire à toutes les époques. Nous avons recherché avec NOEMA (l'interféromètre de l'IRAM) des molécules en absorption devant un quasar, pour lequel nous avons déjà des absorptions de HI et OH en ondes centimétriques. Le résultat a été positif pour CO, et surtout nous avons aussi pu détecter la molécule CN (Combes *et al.*, 2019). Ces travaux montrent une bonne synergie entre le mm et le cm, qui va se développer dans le futur avec les précurseurs de SKA (projet MALS sur MeerKAT).

Le problème des flots de refroidissement dans les amas à cœur froid est en passe d'être résolu ; nous avons appris que l'instabilité thermique permet au gaz très chaud (10-100 millions de degrés) de se refroidir et de former un ensemble multiphase, jusqu'à du gaz moléculaire très froid (20 K). Avec ALMA, de plus en plus d'amas à cœur froid ont été observés, dans le but de cartographier le gaz moléculaire dans la molécule CO. Avec notre étudiante Valéria Olivares, nous avons compilé tous les résultats disponibles avec ALMA et MUSE en Halpha, afin de tirer des conclusions statistiques (Olivares *et al.*, 2019). Nous avons notamment mis en évidence deux

classes d'amas, ceux qui possèdent encore des filaments Halpha (enveloppe des filaments moléculaires) et qui ne sont pas encore relaxés, puis ceux qui possèdent un disque moléculaire en rotation au centre de la galaxie centrale de l'amas, et qui sont donc déjà entrés dans une phase relaxée.

Enfin, nous avons étudié un des candidats récents à la matière noire, une particule hypothétique, semblable aux axions. Sa masse est de 10^{-22} eV, et elle se comporte comme un boson. Sa longueur de de Broglie est de 1 kpc, et le soliton formé par le condensat de Bose-Einstein (BEC) au centre des galaxies représente le cœur de matière noire observé dans les courbes de rotation. Les interférences quantiques de ces particules forment à toute échelle des granules, qui font varier le potentiel sur une échelle de temps très rapide, encore plus courte que le temps dynamique. Ces fluctuations vont chauffer les disques, et ceci place des contraintes sur la masse de la particule hypothétique (El Zant *et al.*, 2019).

PUBLICATIONS

ALONSO-HERRERO A., GARCIA-BURILLO S., PEREIRA-SANTAELLA M., DAVIES R.I., COMBES F., VESTERGAARD M., RAIMUNDO S. I., BUNKER A., DIAZ-SANTOS T., GANDHI P., GARCIA-BERNETE I., HICKS E.K.S., HOENIG S. F., HUNT L.K., IMANISHI M., IZUMI T., LEVENSON N.A., MACIEJEWSKI W., PACKHAM C., RAMOS ALMEIDA C., RICCI C., RIGOPOULOU D., ROCHE P.F., ROSARIO D., SCHARTMANN M., USERO A. et WARD M.J., « A nuclear molecular outflow in the Seyfert galaxy, NGC3227 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 628, 2019, A65, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935431> [arXiv : 1906.06889].

COMBES F., « Star formation efficiency in low surface brightness regions », in P. DI MATTEO, O. CREEVEY, A. CRIDA, G. KORDOPATIS, J. MALZAC, J.-B. MARQUETTE, M. N'DIAYE et O. VENOT (dir.), *SF2A-2019: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, [s.l.], Société française d'astronomie et d'astrophysique, 2019, p. 241-244 [arXiv : 1906.02708].

JACHYM P., KENNEY J.D.P., SUN M., COMBES F., CORTESE L. SCOTT T.C., SIVANANDAM S., BRINKS E., ROEDIGER E., PALOUS J. et FUMAGALLI M., « ALMA unveils widespread molecular gas clumps in the ram pressure stripped tail of the Norma jellyfish galaxy », *The Astrophysical Journal*, vol. 883, n° 2, 2019, 145, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab3e6c> [arXiv : 1905.1324].

MANCILLAS B., COMBES F., DUC P.-A., « The molecular gas content of shell galaxies », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 630, 2019, A112, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935968> [arXiv : 1905.11356].

HUSEMANN B., SCHARWAECHTER J., DAVIS T.A., PEREZ-TORRES M., SMIRNOVA-PINCHUKOVA I., TREMBLAY G.R., KRUMPE M., COMBES F., BAUM S.A., BUSCH G., CONNOR T., CROOM S.M., GASPARI M., KRAFT R.P., O'DEA C.P., POWELL M., SINGHA M. et URRUTIA T., 2019, « The Close AGN Reference Survey (CARS). A massive multi-phase outflow impacting the edge-on galaxy HE1353-1917 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 627, 2019, A53, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935283>.

SMIRNOVA-PINCHUKOVA I., HUSEMANN B., BUSCH G., APPLETON P., BETHERMIN M., COMBES F., CROOM S., DAVIS T.A., FISCHER C., GASPARI M., GROVES B., KLEIN R., O'DEA C.P., PEREZ-TORRES M., SCHARWAECHTER J., SINGHA M., TREMBLAY G.R. et URRUTIA T., « The Close AGN Reference Survey (CARS). Discovery of a global [CII] $158 \mu\text{m}$ line excess in AGN HE1353-1917 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 626, 2019, L3, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935577>.

AALTO S., MULLER S., KOENIG S., FALSTAD N., MANGUM J., SAKAMOTO K., PRIVON G.C., GALLAGHER J., COMBES F., GARCIA-BURILLO S., MARTIN S., VITI S., VAN DER WERF P.,

- EVANS A.S., BLACK J.H., VARENIUS E., BESWICK R., FULLER G., HENKEL C., KOHNO K., ALATALO K. et MUEHLE S., « The hidden heart of the luminous infrared galaxy IC 860 I. A molecular inflow feeding opaque, extreme nuclear activity », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 627, 2019, A147, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935480> [arXiv : 1905.07275].
- NEUMANN J., GADOTTI D.A., WISOTZKI L., HUSEMANN B., BUSCH G., COMBES F., CROOM S.M., DAVIS T.A., GASPARI M., KRUMPE M., PEREZ-TORRES M.A., SCHARWAECHTER J., SMIRNOVA-PINCHUKOVA I., TREMBLAY G.R. et URRUTIA T., « The Close AGN Reference Survey (CARS): Comparative analysis of the structural properties of star-forming and non-star-forming galaxy bars », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 627, 2019, A26, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834441>.
- AUDIBERT A., COMBES F., GARCIA-BURILLO S., HUNT L., ECKART A., AALTO S., CASASOLA V., BOONE F., KRIPS M., VITI S., MULLER S., DASYRA K., VAN DER WERF P. et MARTIN S., « ALMA captures feeding and feedback from the active galactic nucleus in NGC613 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 632, 2019, A33, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935845> [arXiv : 1905.01979].
- VRTILEK J.M., O'SULLIVAN E., KOLOKYTHAS K., DAVID L., SCHELLENBERGER G., COMBES F. ET SALOMÉ P., « The Complete Local-Volume Groups Sample (CLoGS): Progress in X-ray, radio continuum, and CO line observations », *HEAD*, vol. 17, 2019, 107.21.
- CALZADILLA M., RUSSELL H., McDONALD M., FABIAN A., BAUM S., COMBES F., DONAHUE M., EDGE A., MCNAMARA B., NULSEN P.E.J., O'DEA C., OONK R., TREMBLAY G. et VANTYGHEM A., « Revealing a highly dynamic cluster core in Abell 1664 with Chandra », *HEAD*, vol. 17, 2019, 107.01.
- GEACH J.E. *et al.*, « The case for a 'sub-millimeter SDSS': A 3D map of galaxy evolution to $z \sim 10$ », *Bulletin of the AAS*, vol. 51, n° 3 (*Astro2020: Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics, science white papers*), n° 549, 2019 [arXiv : 1903.04779].
- RUSSELL H.R., MCNAMARA B.R., FABIAN A.C., NULSEN P.E.J., COMBES F., EDGE A.C., MADAR M., OLIVARES V., SALOMÉ P. et VANTYGHEM A.N., « Driving massive molecular gas flows in central cluster galaxies with AGN feedback », *MNRAS*, vol. 490, n° 3, 2019, p. 3025-3045, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2719> [arXiv : 1902.09227].
- OLIVARES V., SALOMÉ P., COMBES F., HAMER S., GUILLARD P., LEHNERT M.D., POLLES F., BECKMANN R.S., DUBOIS Y., DONAHUE M., EDGE A., FABIAN A.C., MCNAMARA B., ROSE T., RUSSELL H., TREMBLAY G., VANTYGHEM A., CANNING R.E.A., FERLAND G., GODARD B., HOGAN M., PEIRANI S. et PINEAU DES FORETS G., « Ubiquitous cold and massive filaments in cool core clusters », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 631, 2019, A22, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935350> [arXiv:1902.09164].
- DASSA-TERRIER J., MELCHIOR A.-L., COMBES F., « M31 circum-nuclear region: A molecular survey with the IRAM interferometer », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 625, 2019, A148, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834069>.
- ROSE T., EDGE A.C., COMBES F., GASPARI M., HAMER S., NESVADBA N., RUSSELL H., TREMBLAY G.R., BAUM S.A., O'DEA C., PECK A.B., SARAZIN C., VANTYGHEM A., BREMER M., DONAHUE M., FABIAN A.C., FERLAND G., MCNAMARA B.R., MITTAL R., OONK J.B.R., SALOMÉ P., SWINBANK A.M. et VOIT M., « Deep and narrow CO absorption revealing molecular clouds in the Hydra-A brightest cluster galaxy », *MNRAS*, vol. 485, n° 1, 2019, p. 229-238, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz406>
- SALOMÉ Q., SALOMÉ P., GUSDORF A. et COMBES F., « Physical conditions in Centaurus A's northern filaments I: APEX mid-J CO observations of CO-bright regions », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 627, 2019, A6, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833866>.
- FALSTAD N., HALLQVIST F., AALTO S., KOENIG S., MULLER, S., ALADRO R., COMBES F., EVANS A.S., FULLER G.A., GALLAGHER J.S., GARCIA-BURILLO S., GONZALEZ-ALFONSO E., GREVE T.R., HENKEL C., IMANISHI M., IZUMI T., MANGUM J.G., MARTIN S., PRIVON G.C., SAKAMOTO K., VEILLEUX S. et VAN DER WERF P.P., « Hidden or missing outflows in highly

obscured galaxy nuclei? », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 623, 2019, A29, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834586>.

DAVIS B.L., GRAHAM A.W. et COMBES F., « A consistent set of empirical scaling relations for spiral galaxies: The $(v_{\max}, M_{\text{OM}})$ - $(\sigma_0, M_{\text{BH}}, \phi)$ relations », *The Astrophysical Journal*, vol. 877, n° 1, 2019, 64, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1aa4>.

FAZELI N., BUSCH G., VALENCIA-S. M., ECKART A., ZAJACEK M., COMBES F. et GARCIA-BURILLO S., « Near-infrared observations of star formation and gas flows in the NUGA galaxy NGC 1365 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 622, 2019, A128, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834255>.

COMBES F., GUPTA N., JOZSA G.I.G. et MOMJIAN E., « Discovery of CO absorption at $z = 0.05$ in G0248+430 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 623, 2019, A133, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935057>.

DI MATTEO P., FRAGKOU DI F., KHOPERSKOV S., CIAMBUR B., HAYWOOD M., COMBES F. et GOMEZ A., « The disc origin of the Milky Way bulge: On the necessity of the thick disc », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 628, 2019, A11, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832606> [arXiv : 1901.00777].

CASTIGNANI G., COMBES F., SALOMÉ P., BENOIST C., CHIABERGE M., FREUNDLICH J., et DE ZOTTI G., « Molecular gas in radio galaxies in dense Mpc-scale environments at $z = 0.4 - 2.6$ », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 623, 2019, A48, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834066>.

FREUNDLICH J., COMBES F., TACCONI L.J., GENZEL R., GARCIA-BURILLO S., NERI R., CONTINI T., BOLATTO A., LILLY S., SALOMÉ P., BICALHO I.C., BOISSIER J., BOONE F., BOUCHÉ N., BOURNAUD F., BURKERT A., CAROLLO M., COOPER M.C., COX P., FERUGLIO C., FOERSTER SCHREIBER N.M., JUNEAU S., LIPPA M., LUTZ D., NAAB T., RENZINI A., SAINTONGE A., STERNBERG A., WALTER F., WEINER B., WEISS A. et WUYTS S., « PHIBSS2: Survey design and $z = 0.5 - 0.8$ results. Molecular gas reservoirs during the winding-down of star formation », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 622, 2019, A105, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732223>.

VANTYGHM A.N., MCNAMARA B.R., RUSSELL H.R., EDGE A.C., NULSEN P.E.J., COMBES F., FABIAN A.C., McDONALD M., et SALOMÉ P., « An enormous molecular gas flow in the RXJ0821+0752 galaxy cluster », *The Astrophysical Journal*, vol. 870, 2019, 57, <https://doi.org/10.3847/1538-4357%2Faa1b4>.

KHOPERSKOV S., DI MATTEO P., GERHARD O., KATZ D., HAYWOOD M., COMBES F., BERCIK P. et GOMEZ A., « The echo of the bar buckling: phase-space spirals in *Gaia* DR2 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 622, n° 1, 2019, L6, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834707>.

COMBES F., GARCIA-BURILLO S., AUDIBERT A., HUNT L., ECKART A., AALTO S., CASASOLA V., BOONE F., KRIPS M., VITI S., SAKAMOTO K., MULLER S., DASYRA K., VAN DER WERF P. et MARTIN S., « ALMA observations of molecular tori around massive black holes », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 623, 2019, A79, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834560>.

BOSELLI A., FOSSATI M., LONGOBARDI A., CONSOLANDI G., AMRAM P., SUN M., ANDREANI P., BOQUIEN M., BRAINE J., COMBES F., COTE P., CUILLANDRE J.C., DUC P.A., EISELLEM E., FERRARESE L., GAVAZZI G., GWYN S., HENSLER G., PENG E.W., PLANA H., ROEDIGER J., SANCHEZ-JANSSEN R., SARZI M., SERRA P. et TRINCHIERI G., « A Virgo environmental survey tracing ionised gas emission (VESTIGE). V. Properties of the ionised gas filament of M87 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 623, 2019, A52, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834492>.

CORTZEN I., GARRETT J., MAGDIS G., RIGOPOULOU D., VALENTINO F., PEREIRA-SANTAELLA M., COMBES F., ALONSO-HERRERO A., TOFT S., DADDI E., ELBAZ D., GOMEZ-GUIJARRO C., STOCKMANN M., HUANG J. et KRAMER C., « PAHs as tracers of the molecular

gas in star-forming galaxies », *MNRAS*, vol. 482, n° 2, 2019, p. 1618-1633, <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2777>.

CALZADILLA M.S., RUSSELL H.R., McDONALD M., FABIAN A.C., BAUM S.A., COMBES F., DONAHUE M., EDGE A.C., MCNAMARA B.R., NULSEN P.E.J., O'DEA C.P., OONK J.B.R., TREMBLAY G.R. et VANTYGHEM A.N., « Revealing a highly-dynamic cluster core in Abell 1664 with *Chandra* », *The Astrophysical Journal*, vol. 875, n° 1, 2019, 65, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab09f6>.

BICALHO I.C., COMBES F., RUBIO M., VERDUGO C. et SALOMÉ P., « ALMA CO(2-1) observations in the XUV disk of M83 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 623, 2019, A66, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732352>.

HERRERA-CAMUS R., TACCONI L.J., GENZEL R., FOERSTER SCHREIBER N.M., LUTZ D., BOLATTO A.D., WUYTS S., RENZINI A., LILLY S.J., BELLI S., UEHLER H., SHIMIZU T., DAVIES R., STURM E., COMBES F., FREUNDLICH J., GARCIA-BURILLO S., COX P., BURKERT A., NAAB T., COLINA L., SAINTONGE A., COOPER M., FERUGLIO C. et WEISS A., « Molecular and ionized gas phases of an AGN-driven outflow in a typical massive Galaxy at $z = 2$ », *The Astrophysical Journal*, vol. 871, 2019, 37, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf6a7>.

HAMER S.L., FABIAN A.C., RUSSELL H.R., SALOMÉ P., COMBES F., OLIVARES V., POLLES F.L., EDGE A.C. et BECKMANN R.S., « Discovery of a diffuse optical line emitting halo in the core of the Centaurus cluster of galaxies: Line emission outside the protection of the filaments », *MNRAS*, vol. 483, n° 4, 2019, p. 4984-1998, <https://doi.org/10.1093/mnras/sty3459>.

COMBES F., « IAU-FM6-- Angular momentum -- Conference summary », Proceedings FM6, IAU-GA (Vienna, August 2018), 2018, arXiv : 1810.00796.

CASTIGNANI G., COMBES F., SALOMÉ P., BENOIST C., CHIABERGE M., FREUNDLICH J. et DE ZOTTI G., « Molecular gas in radio galaxies at $z = 0.4 - 2.6$ in (proto-)cluster environment », Proceedings FM3, IAU-GA (Vienne, août 2018), 2018, arXiv : 1809.09568.

BUSCH G., HUSEMANN B., SMIRNOVA-PINCHUKOVA I., ECKART A., BAUM S.A., COMBES F., CROOM S.M., DAVIS T.A., FAZELI N., FISCHER C., GASPARI M., KLEIN R., KRUMPE M., McELROY R., O'DEA C.P., PEREZ-TORRES M.A., POWELL M.C., SANCHEZ-MONGE Á., SCHARWÄCHTER J., TREMBLAY G.R. et URRUTIA T., « The Close AGN Reference Survey (CARS): SOFIA detects spatially-resolved [CII] emission in the luminous AGN HE0433-1028 », *The Astrophysical Journal*, vol. 866, n° 1, 2018, L9, <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aae25d>.

TREMBLAY G.R., COMBES F., OONK J.B.R., RUSSELL H.R., McDONALD M.A., GASPARI M., HUSEMANN B., NULSEN P.E.J., MCNAMARA B.R., HAMER S.L., O'DEA C.P., BAUM S.A., DAVIS T.A., DONAHUE M., VOIT G.M., EDGE A.C., BLANTON E.L., BREMER M.N., BULBUL E., CLARKE T.E., DAVID L.P., EDWARDS L.O.V., EGGERMAN D.A., FABIAN A.C., FORMAN W.R., JONES C., KERMAN N., KRAFT R.P., LI Y., POWELL M.C., RANDALL S.W., SALOMÉ P., SIMIONESCU A., SU Y., SUN M., URRY C.M., VANTYGHEM A.N., WILKES B.J. et ZUHONE J.A., « A galaxy-scale fountain of cold molecular gas pumped by a black hole », *The Astrophysical Journal*, vol. 865, n° 1, 2018, 13, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad6dd>.

O'SULLIVAN E., COMBES F., SALOMÉ P., DAVID L.P., BABUL A., VRTELEK J.M., LIM J., OLIVARES V., RAYCHAUDHURY S. et SCHELLENBERGER G., « Cold gas in a complete sample of group-dominant early-type galaxies », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 618, 2018, A126, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833580>.

COMBES F., « Molecular gas filamentary structures in galaxy clusters », in K. Asada et al. (dir.), *Perseus in Sicily (IAU-S342): From Black Hole to Cluster Outskirts*, 2018, arXiv : 1807.07027.

VANTYGHEM A.N., MCNAMARA B.R., RUSSELL H.R., EDGE A.C., NULSEN P.E.J., COMBES F., FABIAN A.C., McDONALD M. et SALOMÉ P., « Molecular gas filaments and star-forming knots beneath an X-ray cavity in RXC J1504-0248 », *The Astrophysical Journal*, vol. 863, n° 2, 2018, 193, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad2e0>.