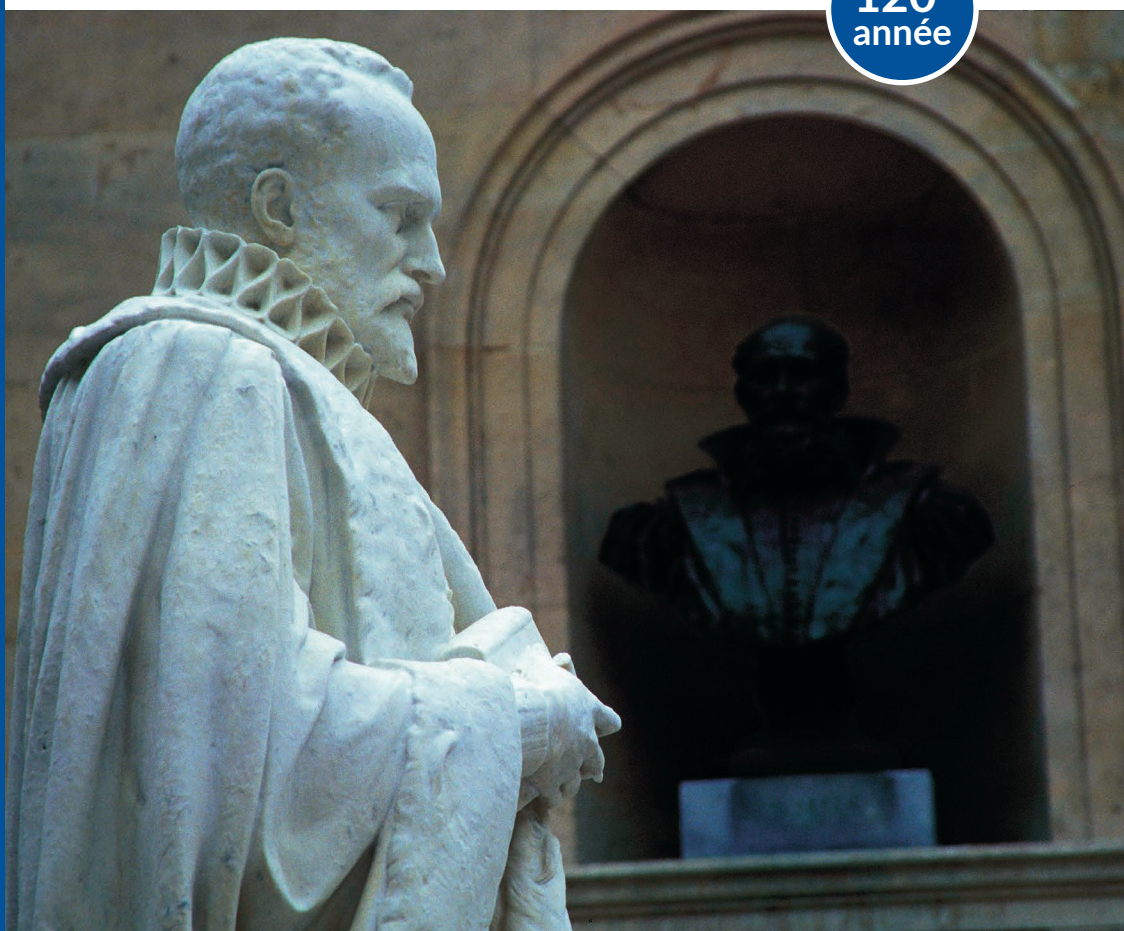


ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2019 - 2020

Résumé des cours et travaux

120^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 : Univers, galaxies, réionisation, champ magnétique

La série de cours et séminaires « L'époque de la réionisation de l'Univers » est disponible en audio et vidéo, sur le site internet du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/site/francoise-combes/course-2019-2020.htm>).

ENSEIGNEMENT

COURS – L'ÉPOQUE DE LA RÉIONISATION DE L'UNIVERS

Introduction

L'Univers commence dans une gigantesque explosion, le Big Bang. La densité d'énergie et la température sont énormes, et dans l'expansion rapide qui suit, l'énergie se dilue et la température décroît. L'Univers est d'abord un plasma de particules chargées, essentiellement électrons et protons. 380 000 ans plus tard, la température est de 3 000 Kelvin, et le gaz se recombine en atome d'hydrogène. Les photons ne sont alors plus diffusés par le plasma et se déplacent en ligne droite jusqu'à nous : après 13,8 milliards d'années, ils correspondent à une température de 2,73 K. La période juste après la dernière diffusion est appelée « âge sombre » ; à cette époque, les structures ne sont que des ébauches de matière noire, il n'y a pas d'étoiles pour éclairer. Peu à peu le gaz d'hydrogène tombe dans ces galaxies sombres, et va former les premières étoiles, qui vont réioniser le gaz intergalactique. Après plusieurs percolations de galaxie en galaxie, tout l'espace sera réionisé : c'est

l'époque de la réionisation. C'est une époque encore méconnue, mais très riche en renseignements sur la formation des structures de l'Univers. Les grands télescopes en ondes métriques, tel que SKA et ses précurseurs, vont pouvoir détecter globalement la raie de l'atome d'hydrogène de l'âge sombre, en émission ou absorption, et la voir disparaître progressivement pendant l'époque de la réionisation.

Cours 1 – Théorie de la réionisation

Séminaire 1 – Simulations de la réionisation

Benoît Semelin (Observatoire de Paris), le lundi 2 décembre 2019

Dans cette première séance, la théorie de la ré-ionisation est développée, et illustrée par des simulations cosmologiques. La dernière surface de diffusion, ou la recombinaison, correspond au *redshift* de $z = 1000$ et à la température de 3000 K ($T(\text{CMB}) = 2,73(1+z)$). À cette date, il faudrait avoir déjà des fluctuations avec une amplitude de l'ordre de 10^{-3} dans la matière sombre, si l'on veut expliquer l'existence de structures très fortement non linéaires aujourd'hui. Pourtant les fluctuations mesurées dans le fonds cosmologique micro-onde ne sont que de 10^{-6} . De plus, grâce au *Hubble Space Telescope* (HST), et son champ ultra-profond, nous pouvons observer les premières galaxies vers $z = 10$, lorsque l'Univers n'avait que 500 millions d'années. D'autres contraintes pour cerner l'époque de réionisation nous viennent des absorptions devant les quasars. Lorsque l'espace entre les galaxies est encore rempli d'atomes, ces derniers absorbent tous les photons d'énergie suffisante pour ioniser l'hydrogène (13,6 eV ou 912 Å), et dans le spectre du quasar, on voit l'effet de Gunn-Peterson, c'est-à-dire une absorption totale, pour les quasars de $z = 5 - 6$. Pour les quasars plus proches, uniquement une forêt Lyman-alpha est produite par l'absorption du gaz atomique au voisinage des galaxies. Le potentiel d'ionisation de l'hélium est plus élevé que celui de l'hydrogène, l'hélium ne se réionise que bien plus tard. La réionisation est lente au départ, il y a peu d'étoiles et surtout la densité n de l'Univers est élevée, en $(1+z)^3$, et le taux de recombinaisons est en n^2 . Puis, elle s'emballe très vite, la densité diminue et le nombre d'étoiles et de galaxies augmente. Le nombre d'électrons sur la ligne de visée est un diagnostic de la durée de l'époque de la réionisation, car les électrons diffusent les photons du fonds cosmologique. L'observatoire spatial WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) et PLANCK indiquent ainsi que la réionisation doit être terminée à $z \sim 6$. Les simulations numériques doivent prendre en compte non seulement le traitement radiatif pour l'ionisation de l'hydrogène, en plus de la dynamique et la formation d'étoiles, mais aussi comment l'hydrogène est excité, afin de prédire le signal à basse fréquence (ondes métriques et décimétriques) pour explorer l'époque de réionisation.

Cours 2 – Observations du gaz atomique à 21 cm

Séminaire 2 – Extraire le signal par filtrage

Réza Ansari (LAL-Orsay), lundi 9 décembre 2019

Qu'attend-on de voir dans le signal à 21 cm de l'hydrogène, décalé à 2 m de longueur d'onde, pour le *redshift* $z = 9$? La théorie montre que si la température du fonds cosmologique varie comme $(1+z)$, celle des atomes de gaz, en expansion adiabatique, décroît en $(1+z)^2$. L'hydrogène va donc devenir plus froid que le fond.

On pourrait le voir en absorption ? Pour cela, il faudrait que la température de spin du niveau fondamental hyperfin de HI se thermalise. Ceci est possible au début de la période, car la densité de l'Univers est assez grande, et par collision $T_{\text{spin}} = T$. Dans ce début, appelé aube cosmique, on s'attend donc à voir le HI en absorption devant le fond CMB. Puis dans l'expansion, la densité n'est plus suffisante, et $T_{\text{spin}} = T(\text{CMB})$, ce qui implique aucun signal. Heureusement, dès qu'il y a assez d'étoiles et de rayonnement UV ionisant, l'hydrogène se recombine avec des raies Lyman-alpha, et l'effet Wouthuysen-Field fait retomber les atomes dans le niveau supérieur, comme pour un pompage optique. Ceci permet de thermaliser à nouveau $T_{\text{spin}} = T$, et on devrait voir une absorption devant le fond CMB. Enfin la formation d'étoiles, les *supernovae*, les rayons X vont chauffer le gaz HI à une température T supérieure au CMB, et on va détecter de l'émission, juste à la fin de la période de réionisation : ensuite il n'y aura plus d'atomes. Seules les simulations peuvent prédire en détail l'évolution du signal en fonction du *redshift*, la réionisation et le chauffage dépendent de l'environnement. Le chauffage par les rayons X dépend du nombre de binaires X dans les galaxies, et aussi des noyaux actifs. De nombreux paramètres libres, qui pourront être déduits des observations, en se servant d'une bibliothèque de modèles.

Les observations sont toutefois très difficiles, le défi principal est de soustraire les avant-plans. Ces avant-plans sont 1 000 à 10 000 fois supérieurs au signal attendu. Ils proviennent d'abord de l'émission synchrotron de la Voie lactée, puis des sources radio des galaxies, de la formation d'étoiles et du rayonnement synchrotron des noyaux actifs, des amas de galaxies. Normalement, ce signal d'avant-plan ne devrait pas varier rapidement avec la fréquence, car il s'agit de rayonnement continu, pas de raies ; alors que le signal attendu de la réionisation provient d'une raie et devrait varier rapidement avec le *redshift*, donc avec la fréquence. Mais il s'agit d'un grand défi, et des techniques de filtrage sont étudiées.

Cours 3 – Galaxies durant l'époque de réionisation

Séminaire 3 – Observations en millimétrique

David Elbaz (CEA-Saclay), le 16 décembre 2019

Les principales questions que l'on se pose dans l'époque de la réionisation, sont relatives au taux de formation d'étoiles, et leur contribution à la réionisation. Quel est le rôle des trous noirs et noyaux actifs dans la réionisation ? Les étoiles seraient efficaces pour réioniser, si le rayonnement UV pouvait sortir librement des galaxies. Mais la plus grande partie est absorbée par les atomes de la galaxie elle-même. Le facteur d'échappement est ainsi un des paramètres inconnus les plus cruciaux. Pour former les étoiles, quelle est la densité et les propriétés physiques du gaz moléculaire : est-il chaud, turbulent, peu efficace ? À quelle vitesse le gaz peut être renouvelé par accréation des filaments cosmiques, ou à quelle vitesse le gaz est éjecté par les explosions de *supernovae* ? Enfin la faible abondance en éléments lourds (métaux) dans le gaz primordial va donner naissance à des étoiles super-massives, que nous ne connaissons pas aujourd'hui : les étoiles exceptionnelles de Population III (PopIII). Où chercher les galaxies à très grand *redshift* ? L'absorption devant les quasars et l'effet de Gunn-Peterson est une méthode. L'observation de ces absorptions montre que les fluctuations sont énormes. La réionisation n'est pas du tout homogène. Il y a des régions déjà réionisées à $z = 8$, par contre d'autres lignes de visée attendront $z = 5$.

Les galaxies dans l'époque de la ré-ionisation ($z > 6$) ont été repérées par la cassure due à la raie Lyman dans leur spectre. L'absorption est très profonde car la galaxie est lointaine et il y a beaucoup d'hydrogène sur la ligne de visée. La photométrie en plusieurs couleurs suffit à indiquer le *redshift* de la source, si faible que la spectroscopie serait trop longue. C'est par ce genre de *survey* photométrique que l'on s'est aperçu que le nombre de galaxies chutait entre $z = 8$ et 10 . On assiste au début de leur formation. Il est possible d'aller plus loin grâce aux lentilles gravitationnelles. Ainsi des galaxies à $z = 11$ ont été observées. Mais leur abondance relative dépend alors des modèles de lentilles. Des galaxies obscurcies ont pu aussi être détectées directement par leur gaz très abondant, avec l'observatoire ALMA dans leurs raies millimétriques. Les galaxies totalement obscurcies par la poussière et invisibles en infrarouge sont rares. Le nouveau télescope spatial JWST (*James Webb Space Telescope*) devrait faire progresser le domaine.

Cours 4 – Cartes globales d'intensité

Séminaire 4 – *Intensity mapping*

Guilaine Lagache (LAM-Marseille), lundi 6 janvier 2020

Une technique tout à fait adaptée à l'époque de réionisation, est la technique des cartes d'intensité (ou IM = *intensity mapping*). Dans le *survey* d'une grande partie du ciel, si le principal intérêt est de détecter des grandes structures, et leur évolution en fonction du *redshift*, il n'est pas nécessaire de détecter toutes les galaxies, mais le *survey* s'effectuera beaucoup plus rapidement en faisant une cartographie grossière, avec de larges pixels, et en détectant l'intensité de chaque pixel, qui peut contenir l'émission de plusieurs galaxies diluées. Bien que cette technique ait été appliquée déjà en continu, rassemblant toutes les sources radio, la méthode est remise au goût du jour pour les raies HI, et aussi celles de CO (le principal traceur de l'hydrogène moléculaire), ou de CII. Pour la raie HI, il existe aussi un enjeu crucial : pouvoir détecter les oscillations acoustiques baryoniques (BAO), qui sont le reflet des ondes acoustiques des photons, détectées dans le fond cosmologique par les satellites millimétriques (WMAP, PLANCK). La taille caractéristique des BAO varie en fonction de l'expansion, et peut donner des renseignements supplémentaires sur la matière noire et l'énergie noire. Les instruments actuels ne peuvent détecter une galaxie HI qu'à $z < 0,2$. Au-delà, il est nécessaire d'utiliser les cartes d'intensité. Une première détection à $z = 0,8$ a montré la faisabilité. De même en combinant tous les absorbants devant des quasars à $z = 2,3$, il a été possible de détecter les BAO de façon très claire. Des tentatives sont effectuées avec la raie H-alpha, traceur de formation d'étoiles. Le but est la détection de la globalité du signal, même venant d'objets trop faibles pour être détectés seuls. Le *survey* donne alors une information statistique sur l'énergie sortant dans la raie. Mais le grand problème est toujours la confusion possible avec d'autres raies.

Une technique prometteuse est de procéder à un filtrage, en corrélant deux raies, comme le HI avec l'optique (H-alpha, etc.), ou bien le CO avec le CII. La corrélation permet de mieux se débarrasser des avant-plans, qui n'ont aucune raison d'être corrélés. Guilaine Lagache nous décrit une expérience de cartes d'intensité en train de se monter au Chili, sur le télescope millimétrique APEX (*Atacama Pathfinder Experiment*). Il s'agit d'observer à 1 mm de longueur d'onde la raie du carbone

ionisé CII, un traceur de la formation d'étoiles. Au repos, la raie est à 0,158 μm , et la carte va donc cibler les *redshift* 5 à 6.

Cours 5 – Les galaxies de $z = 6$ à 12

Séminaire 5 – Les champs frontières du HST

Johan Richard (CRAL-Lyon), le lundi 13 janvier 2020

Il y a plusieurs techniques pour observer les galaxies à grand *redshift*, dans l'époque de la réionisation : (1) les quasars à grand z et leur émission Lyman-alpha, pour repérer la nature de l'absorption, prairie ou forêt ; (2) la technique de la cassure Lyman (LBG), qui permet de tracer la fonction de luminosité *versus* z ; (3) les émetteurs Lyman-alpha ou LAE ; (4) le traçage avec ALMA des raies de CO [CII] ; (5) l'utilisation des lentilles gravitationnelles, pour augmenter la sensibilité à grand *redshift*. Si on connaît bien l'histoire de la formation d'étoiles cosmique, au moins jusqu'au *redshift* $z = 3$, les plus grands *redshifts* sont encore incertains. Il semble bien que la chute soit prolongée après $z = 6 - 8$, mais les incertitudes sont grandes. Le nombre de quasars connus entre $z = 5$ et 7 a beaucoup augmenté (~ 500), mais au-delà de $z = 7$, ils se comptent sur les doigts de la main. Les quasars ont individuellement un fort pouvoir ionisant, jusqu'à 80 Mpc autour d'eux. Cette bulle ionisée permet aux photons de sortir et les émetteurs Lyman-alpha sont plus visibles dans le voisinage. D'autre part, les émetteurs Lyman-alpha suivent les grandes structures et s'observent en groupe : plus de 2 000 ont été observées récemment avec le télescope Subaru, et la forme des spectres nous renseignent sur leur environnement (ionisé ou pas). La raie de [CII], décalée vers le rouge, permet d'explorer des galaxies massives, formant des étoiles, à l'époque de réionisation. Les débuts avec ALMA ont été plus difficiles que prévu, à cause d'effets d'excitation. Les simulations doivent prévoir d'autres recettes pour la formation d'étoiles, le *feedback*, et la métallicité. Il est possible que la réionisation empêche le refroidissement du gaz et la formation d'étoiles dans les galaxies naines, ce qui allégerait le problème des satellites manquants du modèle standard ΛCDM . Les simulations prennent en compte la formation des étoiles massives de Population III (Pop III) uniquement pour la première génération. Les trous noirs peuvent aussi se former très tôt dans les environnements riches. L'observation de quasars à $z > 6$ montre que des trous noirs super-massifs peuvent se former très rapidement, soit à partir d'étoiles de Pop III, soit par effondrement direct.

Cours 6 – Le champ magnétique de l'Univers

Séminaire 6 – Réionisation et champ magnétique

Mathieu Langer (IAS-Orsay), lundi 20 janvier 2020

Les champs magnétiques forts se retrouvent dans plusieurs circonstances dans l'Univers : d'abord dans les étoiles et, parmi elles, les plus condensées : les étoiles à neutrons et les magnétars. Dans les étoiles à neutrons (NS), la principale source d'énergie est le champ magnétique, de l'ordre de $B = 10^9 - 10^{12}$ G. Elles tirent leur énergie de l'accrétion, la rotation, la chaleur interne résiduelle. Une explosion de *supernova* de type II sur 10 000 donne une magnéstar. Ces dernières ont des champs extra-ordinaires, de $B = 10^{14} - 10^{15}$ G, à comparer aux champs B les plus forts créés par l'homme $\sim 5 \cdot 10^5$ G (stationnaire) ou $\sim 10^7$ G (pendant quelques millisecondes). Il

existe aussi des champs forts près des noyaux actifs de galaxies, et même au centre de notre Voie lactée, où les lignes de champ sont tracées par de fins filaments d'émission synchrotron. Dans les galaxies spirales, les ondes de densité produisent des chocs qui renforcent le champ B, le long des bras. L'amplitude du champ peut être mesurée par le degré de polarisation du rayonnement et la rotation Faraday. Le champ magnétique est responsable de la collimation des jets radio. La polarisation transverse qui y est mesurée montre que la structure du champ B est hélicoïdale : certainement le disque d'accrétion d'où est issu le jet imprime sa rotation aux lignes de champ B, gelées dans le disque. On peut considérer le jet radio comme un câble coaxial, où le courant passe dans un sens au centre, puis dans le sens opposé dans la gaine autour. Pour les AGN, le courant se dirige vers le noyau à l'échelle du parsec. Les noyaux actifs sont de véritables batteries cosmiques. Ils pourraient ainsi créer des champs et les propager à tout l'espace par les jets. Dans les amas de galaxies, les fusions créent des chocs qui ré-accélèrent les électrons relativistes : ce sont les reliques radio. Le champ magnétique à grande échelle reste confiné dans les filaments cosmiques de la toile, comme l'indiquent la trajectoire des rayons cosmiques de haute énergie. Son amplitude est contrainte par les photons du CMB. L'origine du champ cosmique pourrait être l'inflation, ou bien grâce à la batterie de Biermann pendant la réionisation. Celle-ci crée de forts gradients de densité et de température, qui produisent des courants, et donc des champs par effet dynamo. L'instabilité de Weibel, due à des courants contraires, pourrait aussi contribuer à ce phénomène.

Cours 7 – Absorptions 21 cm devant les quasars (forêt)

Séminaire 7 – Absorptions comme traceurs de réionisation

Pasquier Noterdaeme (IAP-Paris), lundi 27 janvier 2020

Les raies d'absorption devant les quasars sont l'unique moyen de sonder les filaments cosmiques, le milieu intergalactique (IGM), et d'en déduire la température, les tailles caractéristiques, les densités, la métallicité (Z). Les filaments contiennent la plupart des baryons (80 %) qui ne sont pas dans les galaxies, quel est leur degré d'ionisation ? Il est fondamental de connaître l'interaction entre filaments et galaxies, savoir comment les éléments lourds sont dispersés par les galaxies pour enrichir l'IGM, comment évoluent ces filaments en fonction de z , et quel rôle ils jouent durant l'époque de la réionisation. Il existe plusieurs types d'absorbants : d'abord, la forêt Lyman-alpha ($\text{Ly}\alpha$), due à un grand nombre de petits nuages sur la ligne de visée, situés dans les filaments et les feuilles de la toile cosmique ; ensuite, lorsque la ligne de visée traverse une galaxie, il y a une absorption saturée (DLA) ; et, enfin, un système Ly-limit, où tous les photons d'énergie supérieure sont absorbés (correspondant à 13,6 eV). À chaque DLA, on attend les doublets de CIV ou MgII associés, très utiles pour reconnaître les *redshifts* et les abondances des galaxies absorbantes. À partir des années 2000, les instruments optiques ont permis d'observer les spectres avec grande résolution spectrale (~ 7 km/s), et le nombre d'absorbants sur une ligne de visée peut alors se compter en plusieurs centaines. Le nombre d'absorbants décroît toutefois avec la densité de colonne, comme une loi de puissance, d'exposant $-1,6$. L'observation des absorbants permet d'obtenir l'évolution cosmique du gaz atomique. En particulier dans l'époque de la réionisation, l'épaisseur optique monte considérablement entre $z = 5$ et 7 . La comparaison avec les simulations permet de conclure que la réionisation est à moitié effectuée à $z = 7,5$ et terminée à $z = 5,3$,

avec des poches de HI assez grandes, responsables de la dispersion de l'épaisseur optique. L'étude de la cohérence entre les absorbants pourraient aider à connaître les régions sur-denses, et les futurs amas. Pourtant, il existe souvent des quasars au centre de ces structures qui ionisent tout l'environnement. Les absorptions pendant l'époque de réionisation pourront se faire avec la raie de l'atome HI à 21 cm en longueurs d'ondes métriques.

Cours 8 – Contraintes et perspectives sur la réionisation

Séminaire 8 – CMB et réionisation

Karim Benabed (IAP-Paris), lundi 3 février 2020

Dans un futur proche, de nouveaux instruments vont permettre de progresser dans notre connaissance de l'époque de la réionisation. En optique et infrarouge, la détection des galaxies primordiales, source de réionisation, va être possible avec le nouveau télescope spatial JWST. SPICA (le satellite japonais auquel ont collaboré l'Europe, et notamment la France), en infrarouge lointain, et ALMA, en millimétrique, vont permettre la détection des galaxies les plus obscurcies, et celles qui forment le plus d'étoiles. Enfin, en ondes décimétriques et métriques, il sera possible de détecter le gaz atomique du milieu intergalactique, par cartes d'intensité, avec LOFAR (*Low Frequency Array*) et NenuFAR (*New Extension in Nançay Upgrading LOFAR*) et dans le futur SKA (*Square Kilometer Array*). Les simulations numériques, prenant en compte les particularités des premières galaxies très riches en gaz et faibles en métaux prédisent que les galaxies détectées par JWST produisent 40 % à 80 % de la réionisation. La production de photons ionisants croît avec la masse stellaire (à la fois formation d'étoiles et AGN). La formation d'étoiles domine la réionisation par rapport aux AGN à tous les *redshifts*. JWST pourrait aussi détecter les explosions des étoiles Pop III en *supernovae* à production de paires. Les lentilles gravitationnelles seront utilisées pour en observer 15 à 20 derrière les amas de galaxies à z supérieur à 5. Ces *supernovae* peuvent durer 1 an, au lieu de 2-3 mois pour les *supernovae* ordinaires. Les précurseurs de SKA et éclaireurs essayent déjà de détecter le signal de réionisation : LOFAR, NenuFAR, MWA, Hera. SKA ne sera opérationnel qu'à partir de 2028. Une redéfinition du budget a eu lieu en 2017 (plus d'un milliard d'euros). Lors d'une première étape, d'un budget moitié, SKA1 sera d'abord construite, avec SKAO, l'organisation des 13 pays membres (Australie, Canada, Chine, France, Allemagne, Inde, Italie, Nouvelle-Zélande, Afrique du Sud, Espagne, Suède, Pays-Bas, Royaume Uni) regroupant 40 % de la population mondiale ! SKA1 est constitué d'une partie à basse fréquence, 130 000 dipôles en 512 réseaux de 256 stations sur le site de Boolardy, en Australie de l'Ouest, puis d'une partie à moyenne fréquence, 133 antennes de 15 m, plus 64 antennes de 13,5 m (MeerKAT) sur le site de Karoo, en Afrique du Sud. L'instrument de très grand champ pourra observer des milliards de galaxies, étudier les BAO, la matière et l'énergie noire, en plus de la réionisation.

COURS À L'EXTÉRIEUR

Les trous noirs, au Mégaron d'Athènes (Grèce)

Les trous noirs sont les objets célestes les plus fascinants et les plus mystérieux de l'univers. Cependant, cette année, la première image de l'ombre d'un trou noir a pu être révélée grâce à la collaboration de plusieurs antennes radio sur la planète. Ces objets mystérieux nous réservent encore des surprises.

La majorité des galaxies hébergent en leur centre un trou noir super-massif d'une masse comprise entre un million et quelques milliards de masses solaires. La masse du trou noir est proportionnelle à la masse du bulbe de la galaxie, suggérant une relation étroite entre la formation d'étoiles et la croissance du trou noir.

La matière, en tombant dans le trou noir, libère une énergie considérable, et le noyau de la galaxie devient actif : c'est un quasar. Pourtant, le trou noir ne peut pas avaler plus qu'une certaine limite. Nous expliquerons comment les trous noirs super-massifs, en rejetant leur nourriture, contrôlent ainsi le taux de formation des étoiles dans les galaxies.

RECHERCHE

Nous avons étudié les galaxies actives à jet radio géant (GRG). Ces radiogalaxies géantes sont très rares de par leur taille, qui dépasse les 2 millions d'années-lumière. Nous avons identifié 162 nouvelles GRG principalement du NRAO VLA *sky survey* (NVSS) dans la gamme de *redshift* de 0,03 à 0,95. Nous avons créé une base de données de toutes les GRG connues de 820 sources. Pour la première fois, nous présentons les propriétés multi-longueurs d'onde du plus grand échantillon de GRG, afin de mieux éclairer leur nature. Nos résultats établissent que les distributions de l'indice spectral radio et la masse du trou noir des GRG ne diffèrent pas de celles des radiogalaxies (RG) de taille normale. Cependant, les GRG ont un taux d'accrétion, ou rapport d'Eddington, plus bas que les RG. Elles sont moins efficaces pour rayonner. Notre étude environnementale révèle que seulement 10 % de toutes les GRG peuvent résider au centre des amas de galaxies, confirmant que les jets radio sont empêchés par un environnement dense. Toutes les propriétés sur le spin, masse et accrétion des trous noirs permettent de discuter de leurs scénarios de formation et de croissance.

Avec Kanak Saha et son équipe de l'Iucaa (*Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics*) en Inde, à Pune, nous avons une collaboration financée par l'organisme franco-indien Cefipra (*Indo-French Centre for the Promotion of Advanced Research*). Nous avons dans ce cadre étudié les fusions de galaxies, effectuées dans notre bibliothèque de simulations numériques GALMER. Nous avons étudié l'impact dynamique d'une fusion mineure (rapport de masse 1:10) sur le sort final d'une barre stellaire dans la galaxie principale, par plusieurs simulations GALMER. Les modèles diffèrent par leur énergie orbitale, l'orientation du vecteur de spin orbital et la morphologie de la galaxie satellite (rapport bulbe/disque). Nous démontrons que la barre stellaire centrale, initialement présente dans la galaxie hôte, subit une phase d'amplification après chaque passage au péricentre du satellite ; en concordance avec des études antérieures sur l'excitation de la barre due à la rencontre de la marée. Cependant, une fois la fusion effectuée, la barre stellaire centrale s'affaiblit considérablement, suivie d'une destruction complète de la barre

pour certains modèles. L'accumulation d'étoiles du satellite dans la région centrale joue un rôle clé dans le processus d'affaiblissement/destruction des barres, provoquant une nette augmentation de la concentration de masse centrale ainsi que du contenu de moment angulaire spécifique. Nous constatons que l'efficacité de l'accumulation de masse du satellite dans les parties centrales dépend des paramètres orbitaux ainsi que de la morphologie du satellite. Par conséquent, différents modèles de fusion mineure affichent différents degrés d'affaiblissement/destruction des barres (partiel ou complet).

Nous avons aussi observé, avec le satellite indien ultraviolet AstroSat, une galaxie qui se trouve dans la gamme de *redshift* la moins étudiée, $z = 1,42$, et trouvé pour la première fois qu'un certain flux ultraviolet lointain s'échappait de la galaxie, sans être complètement absorbé. Nous avons détecté de l'émission continue de Lyman avec une fraction d'échappement supérieure à 20 %, dans une galaxie de faible masse. La source fait partie du champ extrêmement profond de Hubble. Il s'agit de la première détection du rayonnement ultraviolet extrême d'une galaxie lointaine à une longueur d'onde au repos de 600 Å, et elle ouvre une nouvelle fenêtre pour contraindre la forme du spectre d'ionisation.

Avec ALMA, nous avons observé la galaxie NGC 1377 et son flot moléculaire ultra-collimaté. Avec des observations à très haute résolution (0,02 seconde d'arc, ou 2 pc) des raies de CO(3–2), HCO+(4–3), HCN(4–3) vibrationnellement excité, nous avons résolu le flot moléculaire, révélant un jet collimaté de 150 pc de long, grumeleux, à grande vitesse. L'émission moléculaire émerge de la colonne vertébrale du jet avec un diamètre moyen de 3-7 pc. Un vent moléculaire en rotation, selon un cône à angle étroit, entoure le jet, lui-même enveloppé par une structure émettrice de CO à plus grande échelle et plus lente. Le jet montre des inversions de vitesse, causées par la précession ou par des changements de direction épisodiques. Nous suggérons qu'un processus important alimentant le flot moléculaire est l'entraînement magnéto-centrifuge. En revanche, l'enveloppe de CO à grande échelle peut être un vent lent ou un cocon qui résulte d'interactions jet-vent. Une structure de poussière asymétrique, nucléaire, de rayon $r \sim 2$ pc et chaude (> 180 K) avec une densité de colonne moléculaire élevée, $N(\text{H}_2) \sim 1,8 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$, est détectée dans la raie HCN. Sa luminosité est probablement alimentée par un AGN très obscurci. Le trou noir super-massif de NGC1377 semble être à la fin d'une phase d'accrétion intense. Ce résultat suscite de nouvelles interrogations quant aux processus de croissance des trous noirs dans les galaxies obscures et poussiéreuses.

Nous avons continué l'étude en absorption avec Tom Rose et collaborateurs de gaz moléculaire dans des galaxies à flot de refroidissement. Nous avons observé avec ALMA la galaxie d'amas la plus brillante Hydra-A, une galaxie elliptique géante proche ($z = 0,054$) avec des jets radio puissants et étendus. Les observations révèlent les raies d'absorption de CO(1–0), CO(2–1), $^{13}\text{CO}(2–1)$, CN(2–1), SiO(5–4), HCO+(1–0), HCO+(2–1), HCN(1–0), HCN(2–1), HNC(1–0) et H₂CO(3–2) devant le noyau galactique actif brillant et compact de la galaxie. Les absorptions sont dues à au moins 12 nuages moléculaires individuels qui se trouvent près du centre de la galaxie et ont des vitesses d'environ -50 à $+10$ km/s par rapport à la vitesse systémique, où les valeurs positives correspondent au mouvement vers l'intérieur. Les profils d'absorption sont la preuve d'un milieu interstellaire grumeleux dans les galaxies d'amas les plus brillantes composées de nuages avec des densités de colonnes, des dispersions de vitesse et des températures d'excitation similaires à celles trouvées à des rayons de plusieurs kpc dans la Voie lactée. Nous montrons

également une variation temporelle d'une section de ~ 10 km/s de large du profil d'absorption, sur une échelle de temps de 2 ans, probablement causée par des mouvements relativistes dans les points chauds de la source du continuum qui modifient l'éclairage de fond des nuages absorbants.

Avec Gianluca Castignani, nous avons observé avec l'observatoire NOEMA (*Northern Extended Millimeter Array*) une galaxie plus brillante d'amas BCG, qui semblait avoir été détecté en CO par une antenne unique. Avec plus de résolution, il s'avère que la BCG n'est pas détectée, mais au contraire deux galaxies de l'amas en train de fusionner, et de plus un autre compagnon avec extension de gaz ou queue due à la pression dynamique. Ces observations de CO(4–3) et du continuum dans SpARCS1049+56 à $z = 1,709$, sont celles de la BCG la plus éloignée connue. Nous détectons deux compagnons riches en gaz à moins de 20 kpc de la BCG, mais pas la BCG elle-même. Le compagnon nord est associé à une paire de galaxies d'amas en fusion, tandis que le sud montre une queue d'émission CO(4–3), qui pourrait être la galaxie-méduse la plus éloignée, c'est-à-dire une galaxie dont le gaz a été balayé par la pression dynamique de l'amas. Actuellement, nous assistons peut-être ainsi à l'inversion de la relation formation d'étoiles *versus* densité de galaxies, en jeu dans l'univers lointain. C'est la première fois que la formation des progéniteurs à grand *redshift* de nos BCG locales peut être étudiée avec autant de détails.

PUBLICATIONS

SAHA K., TANDON S.N., SIMMONDS C., VERHAMME A., PASWAN A., SCHAEERER D., RUTKOWSKI M., BORGOHAIN A., ELMEGREEN B., INOUE A.K., COMBES F., ELMEGREEN D. et PAALVAST M., « AstroSat detection of Lyman continuum emission from a $z = 1.42$ galaxy », *Nature Astronomy*, vol. 4, p. 1185-1194, 2020, <https://doi.org/10.1038/s41550-020-1173-555>.

DABHADE P., COMBES F., SALOME P., BAGCHI J. et MAHATO M., « SAGAN-II: Molecular gas content of giant radio galaxies », *Astronomy & Astrophysics*, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038676> [arXiv : 2006.09388].

CIAMBUR B.C., FRAGKOU DI F., KHOPERSKOV S., DI MATTEO P. et COMBES F., « Double X/peanut structures in barred galaxies -- Insights from an N-body Simulation », *Astronomy & Astrophysics*, 2020, <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3814> [arXiv : 2003.00015].

GHOSH S., SAHA K., DI MATTEO P., COMBES F., « Fate of stellar bars in minor merger of galaxies », *MNRAS*, 2020, <https://doi.org/10.1093/mnras/stab238> [arXiv : 2008.04942].

AALTO S., FALSTAD N., MULLER S., WADA K., GALLAGHER J.S., KOENIG S., SAKAMOTO K., VLEMMINGS W., CECCOBELLO C., DASYRA K., COMBES F., GARCIA-BURILLO S., OYA Y., MARTIN S., VAN DER WERF P., EVANS A.S. et KOTILAINEN J., « ALMA resolves the remarkable molecular jet and rotating wind in the extremely radio-quiet galaxy NGC 1377 », *Astronomy & Astrophysics*, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038282> [arXiv : 2007.07824].

GUPTA N., JAGANNATHAN P., SRIANAND R., BHATNAGAR S., NOTERDAEME P., COMBES F., PETITJEAN P., JOSE J., PANDEY S., KASKI C. *et al.*, « Blind HI and OH absorption line search: first results with MALS and uGMRT processed using ARTIP », *ApJ*, 2020, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abcb85> [arXiv : 2007.04347].

MARKOV V., MEI S., SALOME P., COMBES F., STERN D., GALAMETZ A., DE BREUCK C., WYLEZALEK D., AMODEO S., COOKE E.A., GONZALEZ A.H., HATCH N.A., NOIROT N., RETTURA R., SEYMOUR N., STANFORD S.A. et VERNET J., « Massive molecular gas reservoir around the central AGN in the CARLA J1103 + 3449 cluster at $z = 1.44$ », *Astronomy & Astrophysics*, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038673> [arXiv : 2007.03706].

SCOURFIELD M., VITI S., GARCIA-BURILLO S., SAINTONGE A., COMBES F., FUENTE A., HENKEL C., ALONSO-HERRERO A., HARADA N., TAKANO S., NAKAJIMA T., MARTIN S., KRIPS M., VAN DER WERF P.P., AALTO S., USERO A. et KOHNO K., « ALMA observations of CS in NGC 1068: Chemistry and excitation », *MNRAS*, vol. 496, n° 4, 2020, p. 5308-5329, <https://doi.org/10.1093/mnras/staa1891>.

FAZELI N., ECKART A., BUSCH G., YTTERGREN M., COMBES F., MISQUITTA P. et STRAUBMEIER C., « Near-infrared observations of the gas structure and kinematics in the circumnuclear region of NGC 1672 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 638, n° A36, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937092>.

CHEMIN L., BRAINE J., COMBES F., KAM Z.S. et CARIGNAN C., « Anisotropy of random motions of gas in Messier 33 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 639, n° A145, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935802>.

ALONSO-HERRERO A., PEREIRA-SANTAELLA M., RIGOPOULOU D., GARCIA-BERNETE I., GARCIA-BURILLO S., DOMINGUEZ-FERNANDEZ A.J., COMBES F., DAVIES R.I., DIAZ-SANTOS T., ESPARZA-ARREDONDO D., GONZALEZ-MARTIN O., HERNAN-CABALLERO A., HICKS E.K.S., HOENIG S.F., LEVENSON N.A., RAMOS ALMEIDA C., ROCHE P.F. et ROSARIO D., « Cold molecular gas and PAH emission in Seyfert galaxies », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 639, n° A43, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037642>.

ROSE T., EDGE A.C., COMBES F., HAMER S., MCNAMARA B.R., RUSSELL H., GASPARI M., SALOME P., SARAZIN C., TREMBLAY G.R., BAUM S.A., BREMER M.N., DONAHUE M., FABIAN A.C., FERLAND G., NESVADBA N., O'DEA C., OONK J.B.R. et PECK A.B., « A molecular absorption line survey toward the AGN of Hydra-A », *MNRAS*, vol. 496, 2020, p. 364-380, <https://doi.org/10.1093/mnras/staa1474>.

DABHADE P., MAHATO M., BAGCHI J., SAIKIA D.J., COMBES F., SANKHYAYAN S., ROETTGERING H.J.A., HO L.C., GAIKWAD M., RAYCHAUDHURY S., VAIDYA B. et GUIDERDONI B., « Search and analysis of giant radio galaxies with associated nuclei (SAGAN) – I: New sample and multi-wavelength studies », *Astronomy & Astrophysics*, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038344> [arXiv : 2005.03708 2020].

KRAMER C., NIKOLA T., ANDERL S., BERTOLDI F., BOQUIEN M., BRAINE J., BUCHBENDER C., COMBES F., HENKEL C., HERMELO I., ISRAEL F., RELANO M., ROELLIG M., SCHUSTER K., TABATABAEI F., VAN DER TAK F., VERLEY S., VAN DER WERF P., WIEDNER M. et XILOURIS E., « Gas and dust cooling along the major axis of M33 (HerM33es) – Herschel/PACS [CII] and [OI] observations », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 639, n° A61, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936754> [arXiv : 2005.03683].

CHEN H., SUN M., YAGI M., BRAVO-ALFARO H., BRINKS E., KENNEY J., COMBES F., SIVANANDAM S., JACHYM P., FOSSATI M., GAVAZZI P., BOSELLI A., NULSEN P., SARAZIN C., GE C., YOSHIDA M. et ROEDIGER E., « The ram pressure stripped radio tails of galaxies in the Coma cluster », *MNRAS*, vol. 496, n° 4, 2020, p. 4654-4673, <https://doi.org/10.1093/mnras/staa1868>.

CASTIGNANI G., PANDEY-POMMIER M., HAMER S.L., COMBES F., SALOME P., FREUNDLICH J. et JABLONKA P., « Molecular gas in CLASH brightest cluster galaxies at $z=0.2-0.9$ », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 640, n° A65, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038081>.

SCHELLENBERGER G., DAVID L.P., VRTILEK J., O'SULLIVAN E., LIM J., FORMAN W., SUN M., COMBES F., SALOME P., JONES C., GIACINTUCCI S., EDGE E., GASTALDELLO F., TEMI P., BRIGHENTI F. et BARDELLI S., « Atacama compact array measurements of the molecular mass in the NGC 5044 cooling flow group », *Astrophysics J.*, vol. 894, 2020, p. 72, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab879c> [arXiv : 2004.01717].

MULLER S., ROUEFF E., BLACK J.H., GERIN M., GUELIN M., MENTEN K.M., HENKEL C., AALTO S., COMBES F., MARTIN S. et MARTI-VIDAL I., « Detection of deuterated molecules, but not of lithium hydride, in the $z = 0.89$ absorber toward PKS 1830–211 », *Astronomy &*

Astrophysics, vol. 637, n° A7, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037628> [arXiv : 2003.13436].

COMBES F., « Circum-nuclear molecular disks: role in AGN fueling and feedback, in R.M. ROS *et al.* (dir.), *Education and Heritage in the Era of Big Data in Astronomy (IAU S367)*, Cambridge, Cambridge Press University, coll. « Proceedings of the International Astronomical Union Symposia and Colloquia », n° 367, 2020, <https://doi.org/10.1017/S1743921320001544> [arXiv : 2003.13280].

FAZELI N., BUSCH G., ECKART A., COMBES F., MISQUITTA P. et STRAUBMEIER C., « Central kiloparsec of NGC 1326 observed with SINFONI. A nuclear molecular disc inside the starburst ring », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 638, n° A53, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936451>.

CASTIGNANI G., JABLONKA P., COMBES F., HAINES C.P., RAWLE T., JAUZAC M., EGAMI E., KRIPS M., SPÉRONE-LONGIN D., ARNAUD M., GARCIA-BURILLO S., SCHINNERER E. et BIGIEL F., « Molecular gas and star formation activity in luminous infrared galaxies in clusters at intermediate redshifts », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 640, n° A64, 2019, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937190>.

CASTIGNANI G., COMBES F. et SALOMÉ P., « Environmental processing in cluster core galaxies at $z = 1.7$ », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 635, n° L10, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937155>.

CASTIGNANI G., COMBES F., SALOMÉ P. et FREUNDLICH J., « Molecular gas in distant brightest cluster galaxies », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 635, n° A32, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936148>.

COMBES F., « AGN fueling and feedback, from pc to kpc scale », in M. POVIC (dir.), *Nuclear Activity in Galaxies Across Cosmic Time (IAU S356)*, Cambridge, Cambridge University Press, coll. « Proceedings of the International Astronomical Union Symposia and Colloquia », vol. 356, 2019, [arXiv : 1911.00707].

FERNANDEZ-ONTIVEROS J.A., DASYRA K.M., HATZIMINAOGLOU E., MALKAN M.A., PEREIRA-SANTAELLA M., PAPACHRISTOU M., SPINOGLIO L., COMBES F., AALTO S., NAGAR N., IMANISHI M., ANDREANI P., RICCI C. et SLATER R., « A CO molecular gas wind 340 pc away from the Seyfert 2 nucleus in ESO 420-G13 probes an elusive radio jet », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 633, n° A127, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936552> [arXiv : 1911.00015].

LENKIC L., BOLATTO A.D., FOERSTER SCHREIBER N.M., TACCONI L.J., NERI R., COMBES F., WALTER F., GARCIA-BURILLO S., GENZEL R. et LUTZ D., « Plateau de Bure High- z Blue-Sequence Survey 2 (PHIBSS2): Search for secondary sources, CO luminosity functions in the field, and the evolution of molecular gas density through cosmic time », *Astrophys. J.*, vol. 159, n° 5, 2020, p. 190, <http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ab7458>.

EL-ZANT A., FREUNDLICH J., COMBES F. et HALLE A., « The effect of fluctuating fuzzy axion haloes on stellar dynamics: A stochastic model », *MNRAS*, vol. 492, n° 1, 2020, p. 877-894, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz3478>.

DESSAUGES-ZAVADSKY M., RICHARD J., COMBES F., SCHAEERER D., RUJOPAKARN W., MAYER L., CAVA A., BOONE B., KNEIB J-P., PEREZ-GONZALEZ P.G., PFENNIGER D., RAWLE T.D., TEYSSIER R. et VAN DER WERF P., « Molecular clouds in the Cosmic Snake normal star-forming galaxy 8 billion years ago », *Nature Astronomy*, n° 3, 2019, p. 1115-1121, <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0874-0>.

MANCILLAS B., DUC P.-A., COMBES F., BOURNAUD F., EMSELLEM E., MARTIG M. et MICHEL-DANSAC L., « Probing the merger history of red early-type galaxies with their faint stellar substructures », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 632, n° A122, 2019, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936320>.

GIRARD M., DESSAUGES-ZAVADSKY M., COMBES F., CHISHOLM J., PATRICIO V., RICHARD J. et SCHAEERER D., « Towards sub-kpc scale kinematics of molecular and ionized gas of star-forming galaxies at $z1$ », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 631, n° A91, 2019, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935896>.

BECKMANN R.S., DUBOIS Y., GUILLARD P., SALOME P., OLIVARES V., POLLES F., CADIOU C., COMBES F., HAMER S., LEHNERT M.D. et PINEAU DES FORETS G., « Dense gas formation and destruction in a simulated Perseus-like galaxy cluster with spin-driven black hole feedback », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 631, n° A60, 2019, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936188>.

GARCIA-BURILLO S., COMBES F., RAMOS ALMEIDA C., USERO A., ALONSO-HERRERO A., HUNT L.K., ROUAN D., AALTO S., QUEREJETA M., VITI S., VAN DER WERF P.P., FUENTE A., COLINA L., MARTIN-PINTADO J., HENKEL C., MARTIN S., GRATADOUR D., NERI R. et TACCONI L.J., « ALMA images the many faces of the NGC 1068 torus and its surroundings », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 632, n° A61, 2019, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936606>.

ROUSSEAU-NEPTON L., MARTIN R.P., ROBERT C., DRISSEN L., AMRAM P., PRUNET S., MARTIN T., MOUMEN I., ADAMO A., ALARIE A., BARMBY P., BOSELLI A., BRESOLIN F., BUREAU M., CHEMIN L., FERNANDES R.C., COMBES F., CROWDER C., DELLA BRUNA L., DUARTE PUERTAS S., EGUSA F., EPINAT B., KSOLL V.F., GIRARD M., GÓMEZ LLANOS V., GOULIERMIS D., GRASHA K., HIGGS C., HLAVACEK-LARRONDO J., HO I.-T., IGLESIAS-PÁRAMO J., JONCAS G., KAM Z.S., KARERA P., KENNICUTT R.C., KLESSEN R.S., LIANOU S., LIU L., LIU Q., LUIZ DE AMORIM A., LYMAN J.D., MARTEL H., MAZZILLI-CIRAULO B., MCLEOD A.F., MELCHIOR A.-L., MILLAN I., MOLLÁ M., MOMOSE R., MORISSET C., PAN H.-A., PATI A.K., PELLERIN A., PELLEGRINI E., PÉREZ I., PETRIC A., PLANA H., RAHNER D., RUIZ LARA T., SÁNCHEZ-MENGUIANO L., SPEKKENS K., STASIŃSKA G., TAKAMIYA M., VALE ASARI N. et VÍLCHEZ J.M., « SIGNALS: I. Survey Description », *MNRAS*, vol. 489, n° 4, 2019, p. 5530-5546, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2455>.

COMBES F., « Secular evolution and pseudo-bulges », in R.M. ROS *et al.* (dir.), *Education and Heritage in the Era of Big Data in Astronomy (IAU S367)*, Cambridge, Cambridge Press University, coll. « Proceedings of the International Astronomical Union Symposia and Colloquia », n° 367, 2019, <https://doi.org/10.1017/S1743921319007397> [arXiv : 1908.03149].

FOTOPOULOU C.M., DASYRA K.M., COMBES F., SALOMÉ P. et PAPACHRISTOU M., « Complex molecular gas kinematics in the inner 5 kpc of 4C12.50 as seen by ALMA », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 629, n° A30, 2019, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834416>.

ROSE T., EDGE A.C., COMBES F., GASPARI M., HAMER S., NESVADBA N., PECK A.B., SARAZIN C., TREMBLAY G.R., BAUM S.A., BREMER M.N., MCNAMARA B.R., O'DEA C., OONK J.B.R., RUSSELL H., SALOME P., DONAHUE M., FABIAN A.C., FERLAND G., MITTAL R. et VANTYGHM A., « Constraining cold accretion onto supermassive black holes: Molecular gas in the cores of eight brightest cluster galaxies revealed by joint CO and CN absorption », *MNRAS*, vol. 489, n° 1, 2019, p. 349-365, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2138>.

