

## Galaxies et cosmologie

M<sup>me</sup> Françoise COMBES, membre de l'Institut  
(Académie des sciences), professeur

### ENSEIGNEMENT

#### **Leçon inaugurale. La matière noire dans l'univers<sup>a</sup>**

Cette leçon introductive a servi à faire l'historique de la découverte de la matière noire. L'astronome suisse Fritz Zwicky remarque en 1937 que les galaxies dans les amas comme Coma sont animées de vitesses désordonnées d'une amplitude bien supérieure à ce qui est prévu avec la masse visible des galaxies. Il doit alors exister 100 fois plus de masse invisible dans l'amas, ou bien la gravité de Newton n'est plus valable à ces échelles. Les idées de Zwicky ont mis 40 ans à être acceptées par la communauté des astronomes. La rotation des galaxies, dont la mesure est de plus en plus précise dans les années 1970, révèle aussi de la masse manquante, comme des halos noirs autour de chaque galaxie. Cependant, on découvre par les émissions en rayons X dans les amas du gaz diffus et très chaud, dont la masse peut aller jusqu'à 10 fois la masse des galaxies. Et la rotation de certaines galaxies peut s'expliquer sans matière manquante. La matière noire est-elle vraiment bien établie ? La découverte de grands réservoirs de gaz atomique autour des galaxies, qui permet grâce à la raie hyperfine à 21 cm de mesurer la vitesse de rotation jusqu'à 5 à 10 fois le rayon optique, lorsqu'il n'y a plus d'étoiles, montre sans conteste l'existence de matière noire. Vers 1984, la matière noire devient exotique, on s'aperçoit qu'elle ne peut pas être faite de particules ordinaires. À la fois la nucléosynthèse primordiale, et tout ce que l'on apprend des fluctuations primordiales juste après le Big-Bang, établit le nouveau paradigme de matière noire froide, qui est encore en vigueur aujourd'hui, et qui va faire l'objet des cours en 2015.

---

a. La leçon inaugurale a été publiée sous forme imprimée (Collège de France/Fayard, 2015) et numérique (Collège de France, à paraître ; <http://books.openedition.org/cdf/156>) ; elle est également disponible sous forme audiovisuelle sur le site internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/francoise-combes/inaugural-lecture-2014-12-18-18h00.htm> [NdÉ].

### **Cours 1. Le problème de la matière noire : galaxies spirales<sup>b</sup>**

Ce premier cours a détaillé nos connaissances sur les halos de matière noire autour des galaxies spirales, qui sont caractérisées par des disques en rotation. Dériver une courbe de rotation nécessite plusieurs étapes à partir du champ de vitesses Doppler mesurées par les raies d'émission du gaz, dans un disque projeté sur le ciel. Le champ de vitesse académique est représenté par le diagramme de l'araignée, mais ce diagramme est le plus souvent perturbé, par des ondes spirales ou barres à l'intérieur du disque, ou par des gauchissements du plan en dehors. Ces perturbations devront être interprétées et corrigées avant de pouvoir déduire le champ de vitesse, et par modélisation de la masse visible, en déduire la matière noire. La statistique sur des milliers de courbes de rotation permet ensuite de déduire les paramètres d'une courbe de rotation universelle, qui fait apparaître d'autant plus de matière noire que la galaxie est peu massive, et peu concentrée. Le cas de la Voie lactée est étudié de près, étant donné notre connaissance plus détaillée. La statistique fait aussi apparaître des lois d'échelles, comme la célèbre loi de Tully-Fisher baryonique, qui relie la vitesse de rotation maximale d'une galaxie (donc la matière noire) à la masse visible totale, ou bayonique (gaz et étoiles réunies). Matière noire et matière visible sont intimement reliées.

### **Cours 2. Le problème de la matière noire : galaxies elliptiques et naines**

Ce deuxième cours était dédié aux galaxies elliptiques, et à la détermination de la quantité de matière noire qu'elles abritent. Ces galaxies apparaissent comme des sphéroïdes aplatis, mais ne sont pas aplatis par rotation, comme on pourrait le penser de prime abord. L'aplatissement est dû à l'anisotropie de la dispersion de vitesses des étoiles, sans doute provenant de la formation de ces systèmes, par fusion de galaxies spirales plus petites. En l'absence de rotation, c'est la dispersion de vitesses qui doit nous aider à quantifier la matière noire. Mais cette tâche est beaucoup plus difficile que pour les galaxies spirales, car les vitesses se moyennent sur la ligne de visée, et l'on ne sait pas dé-projeter les elliptiques. Sont-elles des sphéroïdes aplatis comme des galettes (deux grand-axes égaux), ou bien allongés comme des cigares (deux petit-axes égaux), ou même sont-elles des systèmes triaxiaux ? Une revue est faite des divers diagnostics qui nous permettent de mieux cerner cette forme : rotation des isophotes, quantité de rotation par rapport à la dispersion de vitesses mesurée par effet Doppler. Statistiquement, les problèmes de projection peuvent s'éliminer. Les statistiques font apparaître des relations d'échelle, notamment la relation de Faber-Jackson, très similaire à celle de Tully-Fischer pour les spirales, mais où la dispersion remplace la rotation.

### **Cours 3. La matière noire dans la formation des galaxies**

Ce cours décrit le problème aigu de la formation des structures dans un univers en expansion. L'effondrement gravitationnel est très lent, et pourtant les fluctuations

---

b. L'enregistrement des cours et séminaires est disponible sur le site internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/francoise-combes/course-2014-2015.htm> [NdÉ].

initiales de densité extrêmement faibles. Le contraste de densité se développe comme le facteur d'expansion, dans le référentiel comobile. En l'absence de matière noire exotique, l'effondrement ne peut commencer que lorsque la température de l'univers descend en dessous de 3000K, que le plasma se recombine en atomes d'hydrogène, pour que les baryons soient découplés des photons, qui par leur pression empêchent tout effondrement. Alors les contrastes de densité ne pourront jamais approcher 1, et l'univers ne devrait pas être structuré en galaxies et amas aujourd'hui. La matière noire est vraiment la clef de la formation des galaxies, et doit être formée de particules qui se découplent très tôt, à l'époque d'équivalence entre matière et rayonnement, car ces particules n'interagissent pas avec les photons. Les fluctuations primordiales seraient dues à l'inflation, qui est aussi une théorie nécessaire pour résoudre le problème de platitude de l'univers, et le problème de l'horizon : comment se fait-il que le rayonnement cosmologique à 3K soit homogène et isotrope à  $10^{-5}$  près dans tout l'univers observable aujourd'hui, alors qu'il contient une grande quantité d'horizons à l'époque d'émission, donc des régions non causalement connectées ?

#### **Cours 4. Les divers modèles de matière noire**

Ce cours décrit les divers candidats pour la matière noire exotique. D'abord il faut préciser les avantages et défauts comparés des divers types de matière noire : froide, tiède ou chaude, selon que les particules se découplent du reste de l'univers alors qu'elles sont relativistes ou non. Le spectre de masse des halos noirs est très différent dans ces cas-là, par exemple dans le modèle de matière noire froide, qui est le modèle standard aujourd'hui, le nombre de petites structures est très élevé par rapport aux observations, un des problèmes majeurs du modèle. Nous décrivons ensuite les contraintes apportées par le principe de Pauli, si les particules sont des fermions, ou bien le théorème de Liouville dans tous les cas, puisque les particules ne sont pas dissipatives. Il s'avère que ce dernier théorème est le plus fort, et contraint les particules de matière noire à une masse supérieure à quelques keV. Le modèle standard et ses particules favorites les WIMPS sont discutées, de même le miracle des WIMPS qui sont des particules qui s'annihilent par interaction faible, et dont la densité relique aujourd'hui tombe juste à la valeur observée. Toutefois, les limites d'observation directe de WIMPS dans les laboratoires souterrains, et la non-détection de telles particules au LHC du CERN, justifient que d'autres candidats soient étudiés. Une grande quantité de possibilités est abordée, que ce soit des neutrinos stériles (matière noire tiède), ou bien des dimensions supplémentaires, qui feraient apparaître une masse aux particules, etc.

#### **Cours 5. Les simulations cosmologiques de matière noire**

Ce cours montre comment les simulations cosmologiques peuvent nous apprendre énormément sur les propriétés de la matière noire. Les méthodes de simulations sont décrites, d'abord pour le problème à N-corps gravitationnel, puis lorsque l'on ajoute l'hydrodynamique du gaz, et la complexité des phénomènes baryoniques associés : chauffage et refroidissement, dissipation, formation des étoiles à partir du gaz dense moléculaire, rétroaction due à l'explosion des supernovae, ou formation des trous noirs dans les noyaux de galaxies, et rétroaction des noyaux actifs, qui

peuvent stopper la formation d'étoiles, etc. La description des grandes simulations, couvrant une large fraction du volume de l'univers, contenant des dizaines de milliards de particules, nous montre les prédictions du modèle : les profils de matière noire dans les structures quelle que soit leur taille ou masse, sont universels, et ressemblent à une loi de puissance en  $1/R$  vers le centre. Cette distribution singulière est un des problèmes du modèle standard, dans sa confrontation aux observations, car ce genre de cuspide n'est pas observé mais plutôt des plateaux de densité ou cœurs. De plus, chaque halo de galaxie géante comme la Voie lactée abrite probablement des milliers de satellites, qui ne sont pas observés, et qui sont peut-être uniquement en matière noire.

### **Cours 6. Les grands problèmes du modèle standard**

Ce cours détaille les problèmes rencontrés par le modèle standard de matière noire. Un des principaux est que la fraction de baryons détectée dans les galaxies est extrêmement faible, toujours inférieure à 20 % de la fraction de baryons de l'univers (le rapport masse des baryons sur matière totale est de 17 %). Cette fraction de baryons maximise pour les galaxies comme la Voie Lactée, mais devient très faible pour les galaxies naines, et les plus petites doivent même être complètement noires. Comment éjecter les baryons des galaxies ? Pour les plus petites, il pourrait s'agir de la formation d'étoiles, ou même au début des phénomènes liés à la ré-ionisation de l'univers, et pour les plus massives, l'impact des noyaux actifs de galaxies est nécessaire, bien qu'il ne soit pas encore confirmé. Il existe toutefois des petites galaxies naines autour de la Voie lactée, dominées par la matière noire, mais qui ont gardé une fraction de baryons non-négligeable, en contradiction avec les prédictions du modèle standard. D'autres problèmes sont les cuspidés des profils radiaux de matière noire, qui même une fois aplanies par les supernovae, reviennent sans cesse, et rendent les profils toujours plus pentus. Un autre est la perte de moment angulaire des baryons par friction dynamique sur la matière noire, et la formation de disques de galaxies trop petits. Certaines solutions sont avancées, comme la matière noire self-collisionnelle, avec section efficace non-nulle de collision élastique, ou la matière noire tiède pour supprimer la multitude de satellites non observés, etc.

### **Cours 7. Physique des galaxies en gravité modifiée**

Ce cours décrit une alternative au modèle de matière noire, le modèle de gravité modifiée. Il y a un grand nombre de modèles, celui qui représente le mieux les galaxies, et résout le problème du modèle standard aux petites échelles est celui de MOND proposé par Milgrom en 1983. Le principe de modification concerne les champs faibles, lorsque l'accélération de gravité est inférieure à une accélération critique universelle, de l'ordre de  $10^{-10} \text{ m/s}^2$ . Ce régime n'est pas rencontré ni sur Terre, ni dans le système solaire, mais il faut se rendre aux bords de la Galaxie pour commencer à le rencontrer, et seule l'astrophysique peut apporter des informations sur la gravité dans ce régime. Les succès du modèle sont décrits pour les galaxies, naines, spirales ou elliptiques, quel que soit leur type ou masse. Le développement des barres, des spirales est bien reproduit, de même que les interactions de marée entre galaxies, et les fusions. Le modèle rencontre des problèmes pour les amas de

galaxies, ou il manque encore de la masse, même si en moindre quantité que dans le modèle Newtonien. Cette masse pourrait être une certaine quantité de neutrinos, ou alors des baryons noirs, car plus de 80 % des baryons sont en dehors des galaxies, et on ne sait pas encore où exactement. Les rencontres entre amas de galaxies permettent de séparer les diverses matières et pourraient permettre de tester plus en avant les divers modèles.

## **Cours 8. Perspectives de solution : instruments futurs**

Ce dernier cours développe les perspectives du domaine : les grands observatoires du futur, comme E-ELT (télescope européen de 39 m au Chili), le JWST (nouveau télescope spatial infrarouge), ALMA dans le millimétrique, le satellite européen Euclid, ou l'interféromètre radio d'un kilomètre carré de surface (SKA), vont fournir des relevés gigantesques, comprenant des milliards de galaxies, et permettant de mieux comprendre la formation et l'évolution des structures. La croissance des structures sera quantifiée avec tant de précision que la nature de la matière noire, ou de la gravité modifiée en sera éclairée. Les mesures de la raie à 21 cm décalée vers le rouge, permettront de déterminer les courbes de rotation et la distribution des halos noirs des galaxies primordiales, alors que nous ne les connaissons que pour les galaxies locales aujourd'hui. Les lentilles gravitationnelles par millions permettront de mieux tracer la matière noire à toute époque, et les collisions d'amas de galaxies pourront être étudiées de façon statistique. De nombreux tests de gravité modifiée pourront être effectués avec précision, comme la formation de naines de marée lors de l'interaction et fusion entre galaxies, naines qui ne devraient pas posséder de matière noire, etc.

## **Séminaire**

7 janvier 2015 : « Masse manquante dans les galaxies proches », Rodrigo Ibata (Observatoire de Strasbourg)

14 janvier 2015 : « Masse manquante dans les amas de galaxies », Florence Durret (Institut d'astrophysique de Paris)

21 janvier 2015 : « Matière noire et Cosmologie », Joseph Silk (Institut d'astrophysique de Paris et Oxford University)

28 janvier 2015 : « Détection de la matière noire », Gabriel Chardin (Astroparticules, CNRS, Paris)

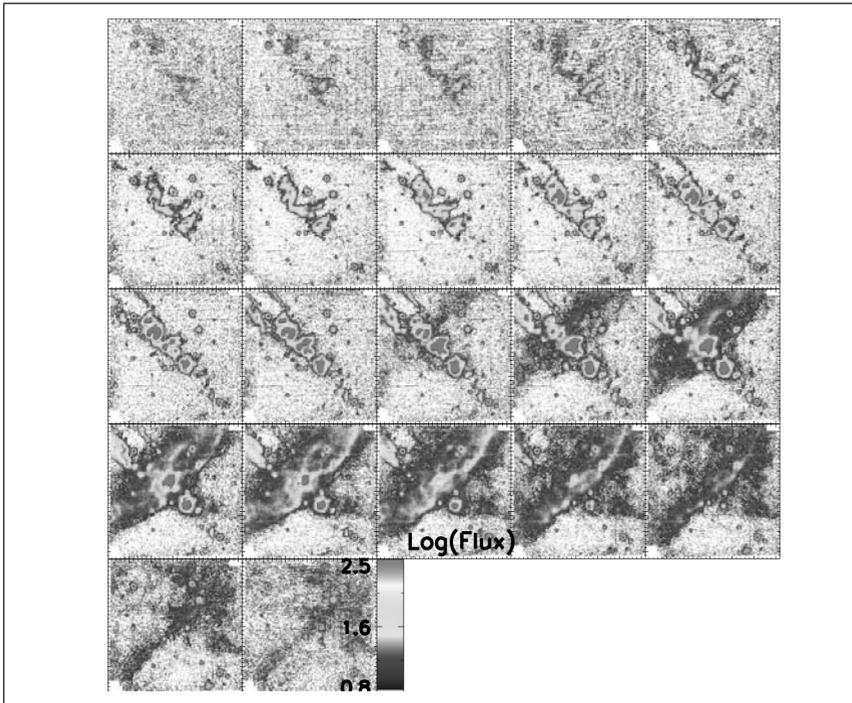
4 février 2015 : « Matière noire et particules », Gianfranco Bertone (GRAPPA, Amsterdam University)

11 février 2015 : « Matière noire et lentilles gravitationnelles », Yannick Mellier (Institut d'astrophysique de Paris)

18 février 2015 : « Matière noire et alternatives », Luc Blanchet (Institut d'astrophysique de Paris)

25 février 2015 : « Matière noire et gravité modifiée », Benoit Famaey (Observatoire de Strasbourg)

### Impact d'un jet radio sur la formation d'étoiles de la galaxie hôte : filaments de Centaurus A



**Figure 1 :** Les 22 cartes par canal de vitesse, de -330 à 300 km/s par 30 km/s, de l'émission de la raie de Balmer  $H\alpha$  de l'hydrogène, dans un filament de la galaxie Centaurus A. La figure montre nettement qu'à basse vitesse, seul le filament émet, et qu'à haute vitesse, vient se superposer un deuxième composant, qui ressemble à un arc, de concavité opposée au centre de la Galaxie, qui se trouve en bas à droite. D'après Hamer *et al.* (2015, *A&A* 575, L3).

Les noyaux actifs de galaxies (AGN) interagissent avec le milieu intergalactique dans les groupes et amas de galaxies à flots de refroidissement, où les jets radio sont soupçonnés de creuser de grandes cavités dans le gaz environnant. Dans la plupart des cas, de très grands filaments optiques, longs de plusieurs kpc, sont également observés tout autour de la galaxie centrale. L'origine de ces filaments n'est toujours pas bien comprise. On observe parfois des régions de formation d'étoiles à l'intérieur des filaments, ce qui est interprété comme une preuve de rétroaction positive, où la formation d'étoiles est déclenchée par l'AGN.

Centaurus A est une galaxie proche, possédant d'énormes filaments optiques alignés avec la direction de jet radio de son AGN. Nous avons obtenu des spectres de ces filaments, dans le but de quantifier les rapports de raies du gaz ionisé pour

tracer les chocs le long du filament, pour avoir par la largeur des raies l'évidence des chocs, et leur structure dynamique à grande échelle. Les observations ont été effectuées avec le nouvel instrument MUSE (*Multi Unit Spectroscopic Explorer*), sur le VLT de l'ESO au Chili.

Nous avons détecté entre 4000 et 7000 Angstroms des raies brillantes de  $H\alpha$ , [NII]  $\lambda 6583$ , [OIII]  $\lambda 4959 + 5007$  et [SII]  $\lambda 6716 + 6731$ . Les filaments sont faits de structures fragmentées à l'intérieur d'un milieu plus diffus, aligné avec l'axe du jet radio. Nous trouvons des chocs en forme de coquilles autour des régions de formation d'étoiles, ce qui suggère que la formation d'étoiles est induite par des chocs. Les rapports de raies dans les fragments sont bien expliqués par une combinaison de chocs et de formation d'étoiles, illuminés par un cône de rayonnement provenant de l'AGN. Nous avons découvert pour la première fois une grande structure en forme d'arc (voir figure 1) : en fait trois arcs perpendiculaires au filament principal ; ils sont cinématiquement, morphologiquement, et d'excitation distincte. La différence d'excitation entre arcs et filaments suggère que les arcs sont probablement situés à l'extérieur du cône de rayonnement et se superposent au filament en projection seulement. Les trois arcs correspondraient à de la matière neutre, balayée par le retour du plasma le long du jet provenant d'une explosion de l'AGN, et ionisée faiblement par un champ de rayonnement diffus, en dehors du cône de rayonnement de l'AGN.

### **Existe-t-il des trous noirs cent fois plus massifs que prévu ?**

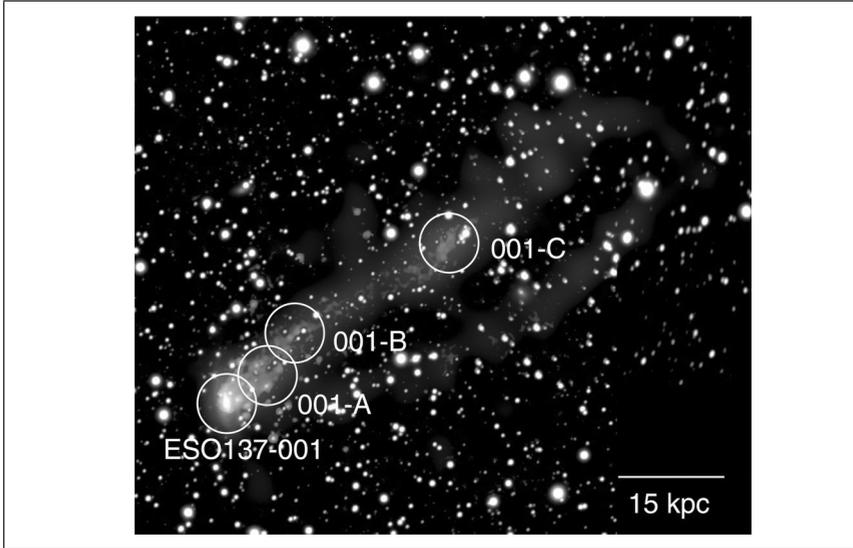
Il est bien établi depuis une vingtaine d'années que chaque galaxie abrite dans son noyau un trou noir super-massif, de masse égale à 0,2-1 % de la masse de son bulbe/sphéroïde. Récemment des exceptions sous forme de trous noirs bien plus massifs auraient été découvertes, mais cela est encore très débattu. La corrélation des masses est interprétée comme co-évolution entre trou noir et galaxie, dont la formation se ferait en symbiose. Des exceptions seraient très intéressantes pour mieux comprendre le phénomène.

Dans la galaxie lenticulaire NGC 1277 au cœur de l'amas de Persée, la découverte du plus grand trou noir jamais observé est tombée comme une surprise. Déterminée grâce à des mesures de vitesse des étoiles, la masse du trou noir serait d'environ 50 % de la masse du bulbe ! Certains astronomes ont contesté ce résultat, qui pourrait être dû à un mauvais modèle de cinématique stellaire, en plus d'une sous-estimation de la masse du bulbe, de telle sorte que le trou noir de NGC 1277 pourrait encore suivre la relation commune entre masse du trou noir et sphéroïde, avec une certaine dispersion. Malgré le faible contenu en gaz des galaxies lenticulaires, nous avons obtenu pour la première fois une carte du gaz moléculaire dans le noyau de cette galaxie avec l'interféromètre millimétrique de l'IRAM (Scharwaechter *et al.*, 2015). La cinématique du gaz, qui peut fournir des modèles de masse plus simples et plus directs que la cinématique stellaire, favorise une grande masse du trou noir, confirmant que ce trou noir est vraiment obèse!

### **Le gaz moléculaire survit-il à son expulsion des galaxies par la pression dynamique ? Virgo et ESO137-001**

Lorsque des galaxies spirales, riches en gaz, sont capturées par un amas de galaxies, elles subissent une forte pression dynamique de la part du gaz chaud (à des millions de degrés) et diffus à l'équilibre entre les galaxies de l'amas. De par la

grande vitesse relative de la galaxie spirale et du gaz de l'amas, le milieu interstellaire peut être balayé violemment en dehors de la galaxie, et former comme une queue de comète. Nous avons détecté dans cette queue de gaz ionisée du gaz moléculaire dense, grâce à son traceur la molécule CO. La survie de ce gaz moléculaire pose un problème, car les nuages vont sans doute s'évaporer, se photo-dissocier, s'ioniser et il est surprenant de trouver des molécules à 80kpc de la galaxie, après un temps de parcours d'un demi-milliard d'années environ (voir figure 2).



**Figure 2 :** Quatre cercles correspondant aux lobes radio de 25 secondes d'arc de diamètre (soit 8.4 kpc) ou le gaz moléculaire et son traceur CO ont été détectés avec le télescope APEX de l'ESO au Chili. Les cercles sont superposés à l'image de la queue de gaz ionisée qui s'échappe de la galaxie ESO137-001 dans l'amas de Norma. La galaxie se déplace à grande vitesse dans l'amas, et rencontre le gaz chaud de l'amas, comme un vent qui la balaye de son gaz, par pression dynamique. La queue de gaz ionisé est longue de 80 kpc, bien plus grande que la galaxie en bas à gauche. D'après Jachym *et al.* (2014, ApJ 792, 11).

Nous avons aussi détecté du gaz dense très loin de la galaxie, dont le milieu interstellaire a été éjecté par pression dynamique, dans l'amas de la Vierge. Dans la queue de traîne, il y avait aussi des régions de formation d'étoiles. Il a été possible de montrer que l'efficacité de formation d'étoiles était très faible, et que le gaz moléculaire pouvait survivre quelques milliards d'années (Verdugo *et al.*, 2015).

### Formation des bulbes de galaxies en gravité modifiée

Dans le modèle standard de la matière noire froide, les bulbes de galaxies peuvent se former facilement par des fusions de galaxies, soit majeures ou mineures (i.e. quel que soit le rapport de masse), ou par la formation de fragments massifs dans

les disques de l'univers jeune, où les fragments sont rapidement entraînés au centre par la friction dynamique. D'autre part des pseudo-bulbes, avec une morphologie et une cinématique plus proches de celles des disques, peuvent se former plus lentement par évolution séculaire avec une barre, où les étoiles résonantes sont élevées perpendiculairement au plan, dans une forme de cacahuète ou de boîte. En conséquence, dans les simulations cosmologiques de matière noire standard, il est très difficile de trouver une galaxie sans bulbe, alors qu'elles sont observées très fréquemment dans l'univers local. La situation est différente dans les modèles alternatifs au problème de la masse manquante. Dans MOND (*Modified Newtonian Dynamics*), les fusions de galaxies sont beaucoup moins fréquentes, car l'absence de halos de matière noire réduit la friction dynamique entre deux galaxies. De même, alors que les galaxies jeunes à grumeaux conduisent rapidement à la formation de bulbe classique dans le modèle standard, nos simulations numériques multi-grille, incluant l'hydrodynamique du gaz et la formation d'étoiles, ont montré que la friction dynamique inefficace avec MOND empêche les grumeaux de fusionner ensemble dans les galaxies jeunes, pour former des sphéroïdes. Cela conduit à des bulbes classiques moins fréquents et moins massifs. Avec MOND les barres sont plus fréquentes et plus fortes, et ont une vitesse de pattern plus constante, ce qui modifie considérablement la morphologie des pseudo-bulbes. Le rapport d'abondance entre pseudo-bulbes et bulbes classiques est prédit bien supérieur dans MOND (Combes, 2014, A & A 571, A82)

### **Migration radiale des étoiles d'une galaxie, gradients d'âge et d'abondance**

La migration radiale des étoiles dans les disques galactiques a reçu beaucoup d'attention dans les études de la dynamique des galaxies et l'évolution chimique, mais reste un phénomène dynamique qui doit être plus précisément quantifié. En utilisant une simulation Tree-SPH d'une galaxie à disque de type Sb, nous quantifions les effets de floutage (excursions radiales) et de mélange (changement de rayon guide, dû à l'échange de moment angulaire). Nous quantifions la migration (soit floutage ou mélange) à la fois en termes de flux (le nombre de migrants passant par un rayon donné), et en estimant la population de migrants à un rayon donné à la fin de la simulation par rapport aux non-migrants, et en donnant aussi la distance sur laquelle la migration est efficace pour tous les rayons. Nous confirmons que la corotation de la barre est la principale source de migration par mélange dans une galaxie, son intensité étant directement liée à l'épisode d'une barre forte, aux débuts de la simulation. Nous montrons qu'à l'intérieur de la résonance externe de Lindblad (OLR), la migration est fortement dominée par le mélange, alors que le floutage prend de plus en plus d'importance vers le disque externe. Plus important encore, nous montrons que l'OLR limite l'échange de moment cinétique, en séparant le disque en deux parties distinctes avec échange minimal ou nul, sauf dans la zone de transition, qui est délimitée par les positions de l'OLR à l'époque de la formation de la barre et à l'époque finale. Ces résultats ont des conséquences intéressantes pour le disque de la Voie lactée. Parce que le Soleil est situé légèrement en dehors de l'OLR, nous suggérons que le voisinage solaire a subi très peu de mélange venant du disque interne (Halle *et al.*, 2015, A&A 578, A58).

## Observation de gaz moléculaire dans des galaxies lointaines : évolution de l'efficacité de formation d'étoiles

Nous avons poursuivi notre étude de galaxies à diverses époques, avec l'interféromètre de l'IRAM. Plusieurs galaxies à redshift  $z = 0.5, 1$  ou  $2$  ont été détectées en gaz moléculaire dans les raies de CO. En combinant nos résultats avec ceux de la littérature, nous avons pu évaluer l'efficacité de la formation d'étoiles sur la séquence principale. Les résultats sur la quantité de gaz obtenus avec la raie de CO ou avec le continuum émis par la poussière concordent, ce qui rassure sur le rapport de conversion CO-H<sub>2</sub> utilisé. Les galaxies forment beaucoup plus d'étoiles à grand redshift, mais ont aussi beaucoup plus de gaz, ce qui rend le temps de déplétion presque constant, bien qu'un peu plus court dans l'univers jeune.

(Genzel *et al.* 2015 ApJ 800, 20).

### PUBLICATIONS

VERDUGO C., COMBES F., DASYRA K., SALOME P. et BRAINE J., « Ram Pressure Stripping in the Virgo Cluster », *Astronomy & Astrophysics*, 582, octobre 2015, A6, DOI : 10.1051/0004-6361/201526551 [arXiv:1507.04388].

SCHARWÄCHTER J., COMBES F., SALOMÉ P., SUN M. et KRIPS M., « The over-massive black hole in NGC 1277: New constraints from molecular gas kinematics », soumis à *MNRAS*, 8 juillet 2015 [arXiv:1507.02292].

GARCIA-BURILLO S., COMBES F., USERO A., AALTO S., COLINA L., ALONSO-HERRERO A., HUNT L.K., ARRIBAS S., COSTAGLIOLA F., LABIANO A., NERI R., PEREIRA-SANTAELLA M., TACCONI L.J. et VAN DER WERF P.P., « High-resolution imaging of the molecular outflows in two mergers: IRAS17208-0014 and NGC1614 », *Astronomy & Astrophysics*, 580, août 2015, A35, DOI : 10.1051/0004-6361/201526133 [arXiv:1505.04705].

TREMBLAY G.R., O'DEA C.P., BAUM S.A., MITTAL R., McDONALD M.A., COMBES F., LI Y., MCNAMARA B.R., BREMER M.N., CLARKE T.E., DONAHUE M., EDGE A.C., FABIAN A.C., HAMER S.L., HOGAN M.T., OONK J.B.R., QUILLEN A.C., SANDERS J.S., SALOMÉ P. et VOIT G.M., « Far-ultraviolet morphology of star-forming filaments in cool core brightest cluster galaxies », *MNRAS*, 451(4), 21 août 2015, 3768-3800, DOI : 10.1093/mnras/stv1151 [arXiv:1505.03533].

AALTO S., MARTIN F., COSTAGLIOLA S.M.F., GONZALEZ-ALFONSO E., MULLER S., SAKAMOTO K., FULLER G.A., GARCIA-BURILLO S., VAN DER WERF P., NERI R., SPAANS M., COMBES F., VITI S., MUEHLE S., ARMUS L., EVANS A., STURM E., CERNICHAO J., HENKEL C. et GREVE T.R., « Probing highly obscured, self-absorbed galaxy nuclei with vibrationally excited HCN », accepté pour publication dans *Astronomy and Astrophysics*, 26 avril 2015 [arXiv:1504.06824].

MITTAL R., WHELAN J.T. et COMBES F., « Constraining star formation rates in cool-core brightest cluster galaxies », *MNRAS*, 450(3), 7 janvier 2015, 2564-2592, DOI : 10.1093/mnras/stv754 [arXiv:1504.00921].

MELCHIOR A.-L. et COMBES F., « Dense gas tracing the collisional past of Andromeda. An atypical inner region? », soumis à *Astronomy and Astrophysics*, 3 avril 2015 [arXiv:1504.00863].

COMBES F., « The Square Kilometer Array: cosmology, pulsars and other physics with the SKA », *Proceedings of INFIERI-2014, Summer School on « Intelligent Signal Processing for Frontier Research and Industry »*. *Journal of Instrumentation*, 10(9), septembre 2015, C09001-C09001, DOI : 10.1088/1748-0221/10/09/C09001 [arXiv:1504.00493].

DASYRA K.M., BOSTROM A.C., COMBES F. et VLAHAKIS N., « A radio jet drives a molecular & atomic gas outflow in multiple regions within one square kiloparsec of the nucleus of the nearby galaxy IC5063 », *Submitted to ApJ*, 18 mars 2015 [arXiv:1503.05484].

CASASOLA V., HUNT L., COMBES F. et GARCIA-BURILLO S., « The resolved star-formation relation in nearby active galactic nuclei », *Astronomy & Astrophysics*, 577, mai 2015, A135, DOI : 10.1051/0004-6361/201425313 [arXiv:1503.00280].

SAKAMOTO K., AALTO S., COMBES F., EVANS A. et PECK A., « An Infrared Luminous Merger with Two Bipolar Molecular Outflows : ALMA View of NGC 3256 », dans ZIEGLER B.L., COMBES F., DANNERBAUER H. et VERDUGO M. (éd.), *Galaxies in 3D across the Universe*, coll. « Proceedings of the International Astronomical Union », 10, 2014, 342-342, DOI : 10.1017/S1743921314010357.

DESSAUGES-ZAVADSKY M., ZAMOJSKI M., SCHAERER D., COMBES F., EGAMI E., SWINBANK A.M., RICHARD J., SKLIAS P., RAWLE T.D., KNEIB J.-P., BOONE F. et BLAIN A., « Molecular gas content in typical L\* galaxies at z~1.5-3 », dans ZIEGLER B.L., COMBES F., DANNERBAUER H. et VERDUGO M. (éd.), *Galaxies in 3D across the Universe*, coll. « Proceedings of the International Astronomical Union », 10, 2014, 285-286, DOI : 10.1017/S1743921314009880.

JACHYM P., SUN M., COMBES F., CORTESE L. et KENNEY J.D.P., « Abundant molecular gas and inefficient SF in intra-cluster regions of a ram pressure stripped tail », dans ZIEGLER B.L., COMBES F., DANNERBAUER H. et VERDUGO M. (éd.), *Galaxies in 3D across the Universe*, coll. « Proceedings of the International Astronomical Union », 10, 2014, 227-229, DOI : 10.1017/S1743921314009740.

SCHAERER D., BOONE F., JONES T., DESSAUGES-ZAVADSKY M., SKLIAS P., ZAMOJSKI M., CAVA A., RICHARD J., ELLIS R., RAWLE T.D., EGAMI E. et COMBES F., « ALMA detection of [CII] 158 micron emission from a strongly lensed z=2 star-forming galaxy », *Astronomy & Astrophysics*, 576, avril 2015, L2, DOI : 10.1051/0004-6361/201425542 [arXiv:1502.03842].

BOQUIEN M., CALZETTI D., AALTO S., BOSELLI A., BRAINE J., BUAT V., COMBES F., ISRAEL F., KRAMER C., LORD S., RELANO M., ROSOLOWSKY E., STACEY G., TABATABAEI F., VAN DER TAK F., VAN DER WERF P., VERLEY S. et XILOURIS M., « Measuring star formation with resolved observations: the test case of M33 », *Astronomy & Astrophysics*, 578, juin 2015, A8, DOI : 10.1051/0004-6361/201423518 [arXiv:1502.01347].

EVANS C., PUECH M., AFONSO J., ALMAINI O., AMRAM P., AUSSSEL H., BARBUY B., BASDEN A., BASTIAN N., BATTAGLIA G., BILLER B., BONIFACIO P., BOUCHÉ N., BUNKER A., CAFFAU E., CHARLOT S., CIRASUOLO M., CLENET Y., COMBES F., CONSELICE C., CONTINI T., CUBY J.-G., DALTON G., DAVIES B., DE KOTER A., DISSEAU K., DUNLOP J., EPINAT B., FIORE F., FELTZING S., FERGUSON A., FLORES H., FONTANA A., FUSCO T., GADOTTI D., GALLAZZI A., GALLEGRO J., GIALLONGO E., GONÇALVES T., GRATADOUR D., GUENTHER E., HAMMER F., HILL V., HUERTAS-COMPANY M., IBATA R., KAPER L., KORN A., LARSEN S., FÈVRE O.L., LEMASLE B., MARASTON C., MEI S., MELLIER Y., MORRIS S., ÖSTLIN G., PAUMARD T., PELLO R., PENTERICCI L., PEROUX C., PETITJEAN P., RODRIGUES M., RODRÍGUEZ-MUÑOZ L., ROUAN D., SANA H., SCHAERER D., TELLES E., TRAGER S., TRESSE L., WELIKALA N., ZIBETTI S. et ZIEGLER B., « The Science Case for Multi-Object Spectroscopy on the European ELT », *ELT-MOS white paper : Instrumentation and methods*, 20 janvier 2015 [arXiv:1501.04726].

COMBES F., « Explaining the Formation of Bulges with MOND », dans LAURIKAINEN E., PELETIER R. et GADOTTI D. (éd.), *Galactic Bulges*, 418, Springer, coll. « Astrophysics and Space Science Library », 2015, 413-428 [arXiv:1501.03603].

HALLE A., DI MATTEO P., HAYWOOD M. et COMBES F., « Quantifying stellar radial migration in an N-body simulation: blurring, churning, and the outer regions of galaxy discs », *Astronomy & Astrophysics*, 578, juin 2015, A58, DOI : 10.1051/0004-6361/201525612 [arXiv:1501.00664].

MUSAIEVA A., KORIBALSKI B.S., FARRELL S.A., SADLER E.M., SERVILLAT M., JUREK R., LENC E., STARLING R.L.C., WEBB N.A., GODET O., COMBES F. et BARRET D., « HI study of the environment around ESO 243-49, the host galaxy of an intermediate mass black hole », *MNRAS*, 447(2), 5 janvier 2015, 1951-1961, DOI : 10.1093/mnras/stu2606 [arXiv:1412.2439].

RESHETNIKOV V. et COMBES F., « Polar-ring galaxies: the SDSS view on the symbiotic galaxies », *MNRAS*, 447(3), 7 janvier 2015, 2287-2294, DOI : 10.1093/mnras/stu2604 [arXiv:1412.2016].

EMSELLEM E., RENAUD F., BOURNAUD F., ELMEGREEN B., COMBES F. et GABOR J., « The interplay between a galactic bar and a supermassive black hole: nuclear fueling in a sub-parsec resolution galaxy simulation », *MNRAS*, 446(3), 27 novembre 2014, 2468-2482, DOI : 10.1093/mnras/stu2209 [arXiv:1410.6479].

DI MATTEO P., GOMEZ A., HAYWOOD M., COMBES F., LEHNERT M.D., NESS M., SNAITH O.N., KATZ D. et SEMELIN B., « Why the Milky Way's bulge is not only a bar formed from a cold thin disk », *Astronomy & Astrophysics*, 577, A1, mai 2015, DOI : 10.1051/0004-6361/201424457 [arXiv:1411.1416].

SALOMÉ Q., SALOMÉ P. et COMBES F., « Jet-induced star formation in 3C 285 and Minkowski Object », *Astronomy & Astrophysics*, 574, A34, février 2015, DOI : 10.1051/0004-6361/201424932 [arXiv:1410.8367].

GUILLARD P., BOULANGER F., LEHNERT M.D., FORÉTS G.P. des, COMBES F., FALGARONE E. et BERNARD-SALAS J., « Exceptional AGN-driven turbulence inhibits star formation in the 3C 326N radio-galaxy », *Astronomy & Astrophysics*, 574, février 2015, A32, DOI : 10.1051/0004-6361/201423612 [arXiv:1410.6155].

SNAITH O., HAYWOOD M., DI MATTEO P., LEHNERT M.D., COMBES F., KATZ D. et GOMEZ A., « Reconstructing the star formation history of the Milky Way disc(s) from chemical abundances », *Astronomy & Astrophysics*, 578, A87, juin 2015, DOI : 10.1051/0004-6361/201424281 [arXiv:1410.3829].

HAMER S., SALOMÉ P., COMBES F. et SALOMÉ Q., « MUSE discovers perpendicular arcs in the inner filament of Cen A », *Astronomy & Astrophysics*, 575, mars 2015, L3, DOI : 10.1051/0004-6361/201424808 [arXiv:1409.7700].

GENZEL R., TACCONI L.J., LUTZ D., SAINTONGE A., BERTA S., MAGNELLI B., COMBES F., GARCÍA-BURILLO S., NERI R., BOLATTO A., CONTINI T., LILLY S., BOISSIER J., BOONE F., BOUCHÉ N., BOURNAUD F., BURKERT A., CAROLLO M., COLINA L., COOPER M.C., COX P., FERUGLIO C., SCHREIBER N.M.F., FREUNDLICH J., GRACIA-CARPIO J., JUNEAU S., KOVAC K., LIPPA M., NAAB T., SALOME P., RENZINI A., STERNBERG A., WALTER F., WEINER B., WEISS A. et WUYTS S., « Combined CO & Dust Scaling Relations of Depletion Time and Molecular Gas Fractions with Cosmic Time, Specific Star Formation Rate and Stellar Mass », *The Astrophysical Journal*, 800, 5 février 2015, 20, DOI : 10.1088/0004-637X/800/1/20 [arXiv:1409.1171].

O'SULLIVAN E., COMBES F., HAMER S., SALOMÉ P., BABUL A. et RAYCHAUDHURY S., « Cold gas in group-dominant elliptical galaxies », *Astronomy & Astrophysics*, 573, janvier 2015, A111, DOI : 10.1051/0004-6361/201424835 [arXiv:1408.7106].

COMBES F., « Models of AGN feedback », dans ZIEGLER B.L., COMBES F., DANNERBAUER H. et VERDUGO M. (éd.), *Galaxies in 3D across the Universe*, coll. « Proceedings of the International Astronomical Union », 10, 2014, 182-189, DOI : 10.1017/S1743921314009636 [arXiv:1408.1591].

DESSAUGES-ZAVADSKY M., ZAMOJSKI M., SCHAEERER D., COMBES F., EGAMI E., SWINBANK A.M., RICHARD J., SKLIAS P., RAWLE T.D., REX M., KNEIB J.-P., BOONE F. et BLAIN A., « Molecular gas content in strongly-lensed  $z \sim 1.5-3$  star-forming galaxies with low IR luminosities », *Astronomy & Astrophysics*, 577, mai 2015, A50, DOI : 10.1051/0004-6361/201424661 [arXiv:1408.0816].

SCHAERER D., BOONE F., ZAMOJSKI M., STAGUHN J., DESSAUGES-ZAVADSKY M., FINKELSTEIN S. et COMBES E., RICHARD J., « New constraints on dust emission and UV attenuation of  $z=6.5-7.5$  galaxies from millimeter observations », *Astronomy & Astrophysics*, 574, février 2015, A19, DOI : 10.1051/0004-6361/201424649 [arXiv:1407.5793].

COMBES E., « Bulge formation in disk galaxies with MOND », *Astronomy & Astrophysics*, 571, novembre 2014, A82, DOI : 10.1051/0004-6361/201424990 [arXiv:1409.4218].

VITI S., GARCÍA-BURILLO S., FUENTE A., HUNT L.K., USERO A., HENKEL C., ECKART A., MARTIN S., SPAANS M., MULLER S., COMBES E., KRIPS M., SCHINNERER E., CASASOLA V., COSTAGLIOLA F., MARQUEZ I., PLANESAS P., VAN DER WERF P.P., AALTO S., BAKER A.J., BOONE F. et TACCONI L.J., « Molecular line emission in NGC1068 imaged with ALMA: II. The chemistry of the dense molecular gas », *Astronomy & Astrophysics*, 570, octobre 2014, A28, DOI : 10.1051/0004-6361/201424116 [arXiv:1407.4940].

DAVID L.P., LIM J., FORMAN W., VRTILEK J., COMBES E., SALOME P., EDGE A., JONES C., SUN M., O'SULLIVAN E., GASTALDELLO F., TEMI P., SCHMITT H., OHYAMA Y., HAMER S., MATHews W., BRIGHENTI F., GIACINTUCCI S., BARDELLI S. et TRUNG D.-V., « Molecular Gas in the X-ray Bright Group NGC 5044 as Revealed by ALMA », *The Astrophysical Journal*, 792(2), 20 août 2014, 94, DOI : 10.1088/0004-637X/792/2/94 [arXiv:1407.3235].

EVANS C.J., PUECH M., BARBUY B., BONIFACIO P., CUBY J.-G., GUENTHER E., HAMMER F., JAGOUREL P., KAPER L., MORRIS S.L., AFONSO J., AMRAM P., AUSSEL H., BASDEN A., BASTIAN N., BATTAGLIA G., BILLER B., BOUCHÉ N., CAFFAU E., CHARLOT S., CLENET Y., COMBES E., CONSELICE C., CONTINI T., DALTON G., DAVIES B., DISSEAU K., DUNLOP J., FIORE F., FLORES H., FUSCO T., GADOTTI D., GALLAZZI A., GIALONGO E., GONÇALVES T., GRATADOUR D., HILL V., HUERTAS-COMPANY M., IBATA R., LARSEN S., FÈVRE O.L., LEMASLE B., MARASTON C., MEI S., MELLIER Y., ÖSTLIN G., PAUMARD T., PELLO R., PENTERICCI L., PETITJEAN P., ROTH M., ROUAN D., SCHAERER D., TELLES E., TRAGER S., WELIKALA N., ZIBETTI S. et ZIEGLER B., « Science Case and Requirements for the MOSAIC Concept for a Multi-Object Spectrograph for the European Extremely Large Telescope », *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V. SPIE Proceedings*, 9147, 28 juillet 2014, 914796, DOI : 10.1117/12.2055857 [arXiv:1406.6369].

TILANUS R.P.J., KRICHBAUM T.P., ZENSUS J.A., BAUDRY A., BREMER M., FALCKE H., GIOVANNINI G., LAING R., VAN LANGEVELDE H.J., VLEMMINGS W., ABRAHAM Z., AFONSO J., AGUDO I., ALBERDI A., ALCOLEA J., ALTAMIRANO D., ASADI S., ASSAF K., AUGUSTO P., BACZKO A.-K., BOECK M., BOLLER T., BONDI M., BOONE F., BOURDA G., BRAJSA R., BRAND J., BRITZEN S., BUJARRABAL V., CALES S., CASADIO C., CASASOLA V., CASTANGIA P., CERNICHAO J., CHARLOT P., CHEMIN L., CLENET Y., COLOMER F., COMBES E., CORDES J., CORIAT M., CROSS N., D'AMMANDO F., DALLACASA D., DESMURS J.-F., EATOUGH R., ECKART A., EISENACHER D., ETOKA S., FELIX M., FENDER R., FERREIRA M., FREELAND E., FREY S., FROMM C., FUHRMANN L., GABANYI K., GALVAN-MADRID R., GIROLETTI M., GODDI C., GOMEZ J., GOURGOULHON E., GRAY M., DI GREGORIO I., GREIMEL R., GROSSO N., GUIRADO J., HADA K., HANSLMEIER A., HENKEL C., HERPIN F., HESS P., HODGSON J., HORNS D., HUMPHREYS E., KRAMER B.H., ILYUSHIN V., IMPELLIZZERI V., IVANOV V., JULIÃO M., KADLER M., KERINS E., KLAASSEN P., KLOOSTER K. van 't, KORDING E., KOZLOV M., KRAMER M., KREIKENBOHM A., KURTANIDZE O., LAZIO J., LEITE A., LEITZINGER M., LEPINE J., LEVSHAKOV S., LICO R., LINDQVIST M., LIUZZO E., LOBANOV A., LUCAS P., MANNHEIM K., MARCAIDE J., MARKOFF S., MARTÍ-VIDAL I., MARTINS C., MASETTI N., MASSARDI M., MENTEN K., MESSIAS H., MIGLIARI S., MIGNANO A., MILLER-JONES J., MINNITI D., MOLARO P., MOLINA S., MONTEIRO A., MOSCADELLI L., MUELLER C., MÜLLER A., MULLER S., NIEDERHOFER F., ODERT P., OLOFSSON H., ORIENTI M., PALADINO R., PANESSA F., PARAGI Z., PAUMARD T., PEDROSA P., PÉREZ-TORRES M., PERRIN G., PERUCHO M., PORQUET D., PRANDONI I., RANSOM S., REIMERS D., REJKUBA M., REZZOLLA L., RICHARDS A., ROS E., ROY A., RUSHTON A., SAVOLAINEN T., SCHULZ R., SILVA M., SIVAKOFF G., SORIA-RUIZ R., SORIA R., SPAANS M., SPENCER R., STAPPERS B., SURCIS G., TARCHI A., TEMMER M., THOMPSON M., TORRELLES J., TRUESTEDT J., TUDOSE V.,

VENTURI T., VERBIEST J., VIEIRA J., VIELZEUF P., VINCENT F., WEX N., WIIK K., WIKLIND T., WILMS J., ZACKRISSON E. et ZECHLIN H., « Future mmVLBI Research with ALMA: A European vision », 18 juin 2014 [arXiv:1406.4650].

DESSAUGES-ZAVADSKY M., VERDUGO C., COMBES F. et PFENNIGER D., « CO map and steep Kennicutt-Schmidt relation in the extended UV disk of M63 », *Astronomy & Astrophysics*, 566, juin 2014, A147, DOI : 10.1051/0004-6361/201323330 [arXiv:1406.0310].

GARCIA-BURILLO S., COMBES F., USERO A., AALTO S., KRIPS M., VITI S., ALONSO-HERRERO A., HUNT L.K., SCHINNERER E., BAKER A.J., CASASOLA F.B.V., COLINA L., COSTAGLIOLA F., ECKART A., FUENTE A., HENKEL C., LABIANO A., MARTIN S., MARQUEZ I., MULLER S., PLANESAS P., ALMEIDA C.R., SPAANS M., TACCONI L.J. et VAN DER WERF P.P., « Molecular line emission in NGC1068 imaged with ALMA. I An AGN-driven outflow in the dense molecular gas », *Astronomy & Astrophysics*, 567, juillet 2014, A125, DOI : 10.1051/0004-6361/201423843 [arXiv:1405.7706].

DAVID L.P., LIM J., FORMAN W.R., VRTILEK J.M., COMBES F., SALOME P., EDGE A., SUN M., GASTALDELLO F., TEMI P., SCHMITT H.R., OHYAMA Y., HAMER S., MATHEWS W.G., BRIGHENTI F., GIACINTUCCI S., BARDELLI S. et TRUNGG D.-V., « Molecular Gas in the Cooling Flow Group NGC 5044 as Revealed by ALMA », *American Astronomical Society, AAS Meeting*, 224, juin 2014, 417.08.

COMBES F., « Cosmic evolution of gas content and accretion », dans FREEMAN K.C., ELMGREEN B.G., BLOCK D.L. et WOOLWAY M. (éd.), *Seychelles conference on galaxy evolution: Lessons from the Local Group*, Dordrecht, Springer, 2015 [arXiv:1405.6405].

DRUARD C., BRAINE J., SCHUSTER K.F., SCHNEIDER N., GRATIER P., BONTEMPS S., BOQUIEN M., COMBES F., CORBELLI E., HENKEL C., HERPIN F., KRAMER C., VAN DER TAK F. et VAN DER WERF P., « The IRAM M33 CO(2-1) Survey - A complete census of the molecular gas out to 7 kpc », *Astronomy & Astrophysics*, 567, juillet 2014, A118, DOI : 10.1051/0004-6361/201423682 [arXiv:1405.5884].

MULLER S., COMBES F., GUELIN M., GERIN M., AALTO S., BEELEN A., BLACK J.H., CURRAN S.J., DARLING J., DINH-V-TRUNG, GARCIA-BURILLO S., HENKEL C., HORELLOU C., MARTIN S., MARTI-VIDAL I., MENTEN K.M., MURPHY M.T., OTT J., WIKLIND T. et ZWAAN M.A., « An ALMA Early Science survey of molecular absorption lines toward PKS1830-211 -- Analysis of the absorption profiles », *Astronomy & Astrophysics*, 566, juin 2014, A112, DOI : 10.1051/0004-6361/201423646 [arXiv:1404.7667].

MULLER S., BLACK J.H., GUELIN M., HENKEL C., COMBES F., GERIN M., AALTO S., BEELEN A., DARLING J., HORELLOU C., MARTIN S., MENTEN K.M., DINH-V-TRUNG et ZWAAN M.A., « Detection of chloronium and measurement of the  $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$  isotopic ratio at  $z=0.89$  toward PKS1830-211 », *Astronomy & Astrophysics Letter*, 566, juin 2014, L6, DOI : 10.1051/0004-6361/201423947 [arXiv:1404.7668].

RHOADS J.E., MALHOTRA S., ALLAM S., CARILLI C., COMBES F., FINKELSTEIN K., FINKELSTEIN S., FRYE B., GERIN M., GUILLARD P., NESVADBA N., RIGBY J., SPAANS M. et STRAUSS M.A., « Herschel Extreme Lensing Line Observations: Dynamics of two strongly lensed star forming galaxies near redshift  $z = 2$  », *The Astrophysical Journal*, 787(8), 20 mai 2014, DOI : 10.1088/0004-637X/787/1/8 [arXiv:1404.7143].

SMAJIC S., MOSER L., ECKART A., VALENCIA-S. M., COMBES F., HORROBIN M., GARCIA-BURILLO S., GARCIA-MARIN M., FISCHER S. et ZUTHER J., « ALMA backed NIR high resolution integral field spectroscopy of the NUGA galaxy NGC 1433 », *Astronomy & Astrophysics*, 567, juillet 2014, A119, DOI : 10.1051/0004-6361/201423642 [arXiv:1404.6562].

DI MATTEO P., HAYWOOD M., GOMEZ A., VAN DAMME L., COMBES F., HALLE A., SEMELIN B., LEHNERT M.D. et KATZ D., « Mapping a stellar disk into a boxy bulge: The outside-in part of the Milky Way bulge formation », *Astronomy & Astrophysics*, 567, juillet 2014, A122, DOI : 10.1051/0004-6361/201322958 [arXiv:1404.0304].

SAKAMOTO K., AALTO S., COMBES F., EVANS A. et PECK A., « A Luminous Infrared Merger with Two Bipolar Molecular Outflows: ALMA and SMA Observations of NGC

3256 », *The Astrophysical Journal*, 797(2), 3 décembre 2014, 90, DOI : 10.1088/0004-637X/797/2/90 [arXiv:1403.7117].

JACHYM P., COMBES F., CORTESE L., SUN M. et KENNEY J.D.P., « Abundant molecular gas and inefficient star formation in intracluster regions: Ram pressure stripped tail of the Norma galaxy ESO137-001 », *The Astrophysical Journal*, 792, 8 août 2014, 11, DOI : 10.1088/0004-637X/792/1/11 [arXiv:1403.2328].

LABIANO A., GARCIA-BURILLO S., COMBES F., USERO A., SORIA-RUIZ R., LOPEZ J.P., FUENTE. A., HUNT L. et NERI R., « Fueling the central engine of radio galaxies. III. Molecular gas and star formation efficiency of 3C 293 », *Astronomy & Astrophysics*, 564, avril 2014, A128, DOI : 10.1051/0004-6361/201323123 [arXiv:1402.7208].

DASYRA K.M., COMBES F., NOVAK G.S., BREMER M., SPINOGLIO L., SANTAELLA M.P., SALOME P. et FALGARONE E., « Heating of the molecular gas in the massive outflow of the local ultraluminous-infrared and radio-loud galaxy 4C12.50 », *Astronomy & Astrophysics*, 565, mai 2014, A46, DOI : 10.1051/0004-6361/201323070 [arXiv:1402.3187].

KRALJIC K., RENAUD F., BOURNAUD F., COMBES F., ELMEGREEN B., EMSELLEM E. et TEYSSIER R., « The role of turbulence in star formation laws and thresholds », *The Astrophysical Journal*, 784(2), avril 2014, 112, DOI : 10.1088/0004-637X/784/2/112 [arXiv:1402.1680].

FREUNDLICH J., JOG C.J. et COMBES F., « Local stability of a gravitating filament: a dispersion relation », *Astronomy & Astrophysics*, 564, avril 2014, A7, DOI : 10.1051/0004-6361/201323325 [arXiv:1402.0977].

COMBES F., GARCIA-BURILLO S., CASASOLA V., HUNT L.K., KRIPS M., BAKER A.J., BOONE F., ECKART A., MARQUEZ I., NERI R., SCHINNERER E. et TACCONI L.J., « ALMA reveals the feeding of the Seyfert 1 nucleus in NGC 1566 », *Astronomy & Astrophysics*, 565, mai 2014, A97, DOI : 10.1051/0004-6361/201423433 [arXiv:1401.4120].

BABUSIAUX C., KATZ D., HILL V., ROYER F., GOMEZ A., ARENOU F., COMBES F., DI MATTEO P., GILMORE G., HAYWOOD M., ROBIN A.C., RODRIGUEZ-FERNANDEZ N., SARTORETTI P. et SCHULTHEIS M., « Metallicity and kinematics of the bar in-situ », *Astronomy & Astrophysics*, 563, mars 2014, A15, DOI : 10.1051/0004-6361/201323044 [arXiv:1401.1925].

SNAITH O.N., HAYWOOD M., DI MATTEO P., LEHNERT M.D., COMBES F., KATZ D. et GOMEZ A., « The dominant epoch of star formation in the Milky Way formed the thick disc », *The Astrophysical Journal*, 781(2), février 2014, L31, DOI : 10.1088/2041-8205/781/2/L31 [arXiv:1401.1835].

## AUTRES ACTIVITÉS

### Participation aux programmes nationaux et internationaux

**Agence nationale pour la recherche :** Projet VACOUL Variation des constantes fondamentales de la Physique : Contraintes observationnelles dans l'univers lointain. Collaboration entre IAP (PI Patrick Petit-Jean) et LERMA (co-PI Françoise Combes) : fin du projet durant l'été 2015

**European Research Council :** ERC-Momentum Advanced Grant (PI : F. Combes) Angular momentum transfer in galaxy formation and evolution (site web <http://aramis.obspm.fr/~combes/ERC-momentum/>), janvier 2011-décembre 2015

### Directions de thèses

Celia Verdugo : septembre 2012-août 2015, *Star formation efficiency in low gas density and low metallicity environments*, soutenance le 21 juillet 2015.

Jonathan Freundlich : octobre 2012-décembre 2015, *Star formation in galaxies, accretion along filaments, and feedback impacting dark matter profiles*, soutenance décembre 2015.

Quentin Salome : octobre 2013 (directeurs : Philippe Salome et Françoise Combes), *AGN feedback and triggered star formation*, soutenance en 2016.

### Autres activités et responsabilités

2015 : Membre du Comité ERC-Advanced Grants Astrophysique (PE9).

2014 : *Chair* du Comité des programmes ALMA.

2015 : *Panel Chair* du Comité des programmes HST.

2014-2015 : Présidente de la division J (Galaxies et cosmologie) de l'IAU (*International Astronomical Union*).

2014-2015 : Présidente du COFUSI (Comité français des unions scientifiques internationales).

2014-2015 : Éditeur de la revue Européenne *Astronomy & Astrophysics*.