

GALAXIES ET COSMOLOGIE

Françoise COMBES

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

Mots-clés : galaxies, cosmologie, trous noirs, formation stellaire, noyaux actifs, quasars, ondes gravitationnelles

La série de cours et séminaires « Trous noirs supermassifs, noyaux actifs et quasars » est disponible, en audio et/ou en vidéo, sur le site internet du Collège de France (<http://www.college-de-france.fr/site/francoise-combes/course-2015-2016.htm>).

ENSEIGNEMENT

COURS ET SÉMINAIRES – TROUS NOIRS SUPERMASSIFS, NOYAUX ACTIFS ET QUASARS

Nous savons depuis une vingtaine d'années que chaque galaxie abrite en son centre un trou noir supermassif, de masse comprise entre 1 million et quelques milliards de masses solaires. Le trou noir le mieux connu est celui du centre de la Voie lactée de 4 millions de masses solaires. Ces trous noirs, lorsqu'ils accrètent de la matière, deviennent des noyaux actifs (ou AGN, pour *Active Galactic Nuclei*) : l'énergie récupérée par la force gravitationnelle est de l'ordre de 20 % de l'énergie de masse mc^2 , bien supérieure à l'efficacité de l'énergie nucléaire de fusion, qui fait vivre les étoiles. Cette accréation donne lieu alors au phénomène de quasar, ou le noyau de la galaxie, dans un volume infinitésimal, rayonne 1 000 fois plus que toute la galaxie hôte. Cette énergie phénoménale serait suffisante pour détruire la galaxie même, si elle était couplée plus intimement à la matière. Mais ce n'est pas le cas : l'énergie s'échappe par les régions de moindre résistance. Pourtant, l'impact sur le gaz et la formation d'étoiles des galaxies n'est pas négligeable, et cette rétroaction pourrait être à l'origine de la relation de proportionnalité entre masse des trous noirs et masse des bulbes des galaxies. Un des phénomènes spectaculaires des AGN est l'éjection de matière perpendiculaire aux disques d'accréation, sous forme de jets radio. Des électrons s'échappent à vitesse relativiste, si bien que ces jets nous

apparaissent superluminiques. Lorsque deux galaxies spirales interagissent par les forces de marée, la friction dynamique les rapproche, et elles finissent par fusionner en une seule galaxie elliptique. Les trous noirs au centre forment alors une binaire, qui, en se resserrant, émet des ondes gravitationnelles. La détection de ces ondes par un réseau de pulsars et leur chronométrage pourront dans l'avenir quantifier le nombre de fusions. La détection par des interféromètres au sol (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory ou LIGO, Virgo) de la fusion de trous noirs de masse stellaires, annoncée en février 2016, est très prometteuse pour l'exploration de cette nouvelle fenêtre ouverte sur l'Univers.

Cours 1 – Trous noirs supermassifs et galaxies

Séminaire – Physique des trous noirs

Jean-Pierre Luminet (LAM, Marseille), le 23 novembre 2015

Les noyaux actifs de galaxies ont été découverts dans les années 1940, d'une part en radioastronomie, par les radiosources de Grote Reber, et en optique par les galaxies de Seyfert. Carl Seyfert découvrit dans le spectre de certaines galaxies des raies très larges, correspondant à 10 000 km/s, et d'émission très compacte, non résolue (région plus petite que 10 parsecs). Seules les raies permises (de Balmer par exemple) montrent ces régions de raies larges (BLR, Broad Line Region). Les raies interdites ([OII], [OIII]...) ne font que quelques centaines de km/s, elles sont confinées aux régions de raies étroites (NLR, Narrow Line Region). En parallèle, étaient découverts des objets très brillants, et ponctuels, ressemblant à des étoiles, appelés quasars (quasi-stars). En 1963, Maarten Schmidt découvre que le spectre des quasars peut s'interpréter comme celui d'une galaxie, mais très décalée vers le rouge (*redshift*). Ce sont alors des objets ponctuels extrêmement lumineux, 1 000 fois plus que toute la galaxie réunie, et ses 200 milliards d'étoiles ! D'où cette énergie vient-elle ? Elle ne peut venir que de l'énergie gravitationnelle de la matière tombant sur un trou noir supermassif. En effet, l'efficacité pour libérer cette énergie est bien plus grande que l'énergie nucléaire de fusion dans les étoiles : celle-ci ne récupère au mieux que 0,7 % de l'énergie de masse mc^2 , alors que les trous noirs peuvent en récupérer 10 % en moyenne. Le monstre central est un trou noir de Schwarzschild (sans rotation) ou de Kerr (avec rotation), et l'on peut dessiner les dernières orbites stables dans les deux cas, un peu au-delà de l'horizon, au-delà duquel plus rien ne sort, pas même la lumière. Pour un trou noir en rotation, il est possible de retirer plus d'énergie encore, et notamment d'éjecter une partie de la matière à vitesse relativiste dans la direction perpendiculaire au disque d'accrétion : ce sont les jets radio. Les conséquences et les diagnostics observationnels sont détaillés.

Cours 2 – Le trou noir du centre de notre Galaxie

Séminaire – Thermodynamique des trous noirs et effet Hawking

Aurélien Barrau (LPSC, Grenoble), le 30 novembre 2015

Le trou noir de notre propre Galaxie est celui qui est le mieux connu, étant le plus proche, et permet de faire des découvertes fondamentales sur les trous noirs supermassifs en général. La distribution de gaz et d'étoiles vers le centre de la Galaxie

est très complexe ; il semble qu'à l'intérieur d'un anneau (la CMZ ou *Central Molecular Zone*), du gaz ionisé tombe vers le centre, en une structure spirale à trois bras. Mais cette structure nucléaire est découplée de l'ensemble, par exemple elle n'est pas vue par la tranche, comme l'ensemble de la Galaxie, mais plus de face. Très près du centre, à moins d'un parsec, plusieurs amas d'étoiles sont observés. Les étoiles les plus proches ont été suivies dans le temps en infrarouge, et leurs mouvements propres indiquent des vitesses de plusieurs milliers de km/s. Les trajectoires sont képlériennes et ont quantifié la masse du trou noir de 4 millions de masses solaires. Le noyau de la Galaxie est très peu actif. C'est une faible source radio (Sagittarius A*) dont le rayonnement est plusieurs ordres de grandeur en dessous des noyaux actifs habituels. Pourtant, notre trou noir était probablement actif il y a 10 ou 100 millions d'années, car des éjections de matière sont encore visibles aux distances comparables. La source Sagittarius A* est observée avec des sursauts X et infrarouge, dont certains ont une quasi-périodicité de 15 minutes. Cela pourrait correspondre à de la matière tournant sur le disque d'accrétion, à une distance correspondant à la période de rotation de 25 minutes (dernière orbite stable). Dans un futur proche, il sera possible d'observer l'ombre du trou noir : le phénomène est dû aux rayons lumineux déviés par le trou noir, comme dans une lentille gravitationnelle. La taille de l'ombre est un peu supérieure à l'horizon du trou noir. La combinaison de radiotélescopes dans le monde permet d'obtenir une résolution spatiale d'une fraction de milli-arcseconde, par interférométrie à longue base (dont ALMA, ou Atacama Large Millimeter Array, interféromètre millimétrique mondial). L'ensemble constitue ce que l'on appelle l'EHT (*Event Horizon Telescope*). L'instrument Gravity permettra aussi des résolutions comparables en infrarouge, sur le VLT (Very Large Telescope) de l'ESO (European Southern Observatory).

Cours 3 – Noyaux actifs et quasars

Séminaire – Disques, tores et jets

Pierre-Olivier Petrucci (IPAG, Grenoble), le 7 décembre 2015

Ce troisième cours est dédié aux propriétés des trous noirs supermassifs. Comment calcule-t-on la masse du trou noir ? La mesure directe, par la cinématique du gaz et des étoiles qui tournent autour, nécessite une grande résolution spatiale, et ne concerne que les galaxies proches, étudiées avec le télescope spatial Hubble. C'est ainsi qu'il a pu être mis en évidence une relation de proportionnalité entre masse du trou noir et masse du bulbe de la galaxie hôte. Pour les galaxies très lointaines, la résolution temporelle et spectrale peut remplacer la résolution spatiale, mais il faut que le trou noir soit actif, donc que ce soit un AGN. Si le continuum de l'AGN varie dans le temps, alors on peut étudier comment la variation se propage vers la région BLR aux raies larges, puis aux raies étroites (NLR). Il s'agit de la méthode de cartographie par réverbération. Il y a aussi dans certains cas l'utilisation des masers H₂O, très puissants, permettant de cartographier et de suivre les variations temporelles de la matière très près du trou noir, en orbite képlérienne. La cartographie par réverbération a pu mettre en évidence une relation entre luminosité et taille de la BLR, dont on se sert ensuite, avec la cinématique mesurée de la BLR. La physique du disque d'accrétion est complexe, le gaz y est très turbulent. Il a pu être mis en évidence une instabilité magnéto-rotationnelle (MRI) caractéristique. Il a aussi été observé des noyaux qui accrètent beaucoup de matière mais ne rayonnent pas. Il

semblerait qu'il existe un régime ADAF (*advection-dominated accretion flow*) où le flot d'accrétion de matière soit dominé par l'advection, dans un grand nombre de galaxies proches, et notamment la Voie lactée, qui ne rayonne qu'à 10^{-9} fois la luminosité d'Eddington. Dans ce régime, toute l'énergie dissipée par viscosité n'est pas rayonnée, mais entraînée directement dans le trou noir. Ce régime se produit à faible taux d'accrétion. Il n'y a plus alors de disque mince, mais un tore épais. Dans ce régime, il y a formation de couronne, et émission de rayons X durs, par émission Compton inverse sur les électrons relativistes.

Cours 4 – Galaxies à jets radio et optiques

Séminaire – Disques d'accrétion, mécanismes d'éjection

Gilles Henri (IPAG, Grenoble), le 14 décembre 2015

Ce cours décrit les jets radio, formés de particules chargées relativistes, éjectées par un AGN en régime faible. Les AGN puissants en radio ne sont qu'une faible partie de tous les AGN (environ 10 %). Il faut distinguer l'émission de jets, très collimatés, qui viennent du trou noir lui-même, des vents ionisés qui sont émis par les disques d'accrétion, et dont l'angle d'ouverture est beaucoup plus large. Les jets radio forment des structures spectaculaires, qui peuvent atteindre 100 kiloparsecs en dehors de la galaxie. Ils commencent par des jets très fins, asymétriques car le jet venant vers l'observateur est boosté par effet Doppler relativiste, puis se terminent en lobes ralentis plus épais. Il est parfois observé plusieurs cycles d'éjection, et l'on peut en déduire que la durée typique d'activité de l'AGN est comprise entre 10 et 100 millions d'années. Les jets sont parfois déformés par le vent intergalactique, lorsque l'AGN se déplace dans un amas avec une vitesse de l'ordre de quelques centaines de km/s. Lorsque le gaz ionisé est éjecté par bouffées, on peut suivre temporellement l'avancement de celles-ci avec une interférométrie à longue base (VLBI, Very Long Baseline Interferometry) et la plupart des jets sont observés superluminiques. Ils ont en apparence une vitesse de déplacement jusqu'à 10 fois la vitesse de la lumière, mais c'est une illusion, due au fait que les fragments s'avancant vers l'observateur ont moins de distance à parcourir. En d'autres termes, les temps relatifs de déplacement et de propagation sont comparables. Comment les jets radio sont-ils éjectés ? On peut montrer qu'il est possible d'extraire de l'énergie du trou noir, si celui-ci est en rotation : c'est le processus de Blandford-Znajek. Les jets sont ensuite confinés et collimatés par les champs magnétiques, comme le montrent les simulations numériques. L'observation de microquasars, dont les variations sont à échelle humaine, permet de mieux comprendre les processus des quasars, et le cycle faible accrétion (ADAF, spectre de rayons X durs), forte accrétion (disque mince et spectre de rayons X mous).

Cours 5 – Dynamique du gaz autour des trous noirs

Séminaire – Alimentation des trous noirs

Santiago García-Burillo (Madrid, Espagne), le 4 janvier 2016

Ce cours s'attaque au problème de l'alimentation des trous noirs supermassifs. Pour expliquer le rayonnement typique d'un quasar, il faudrait avaler pendant une phase d'activité de 100 millions d'années au moins 200 millions de masses solaires

de gaz, ce qui est une fraction significative du gaz d'une galaxie. Comment évacuer en si peu de temps tout le moment angulaire de cette matière ? Pour cela, il faut exercer des couples de torsion, à plusieurs échelles. Les barres dans les galaxies, et les instabilités gravitationnelles, qui forment des non-axisymétries, peuvent fournir des couples de torsion. Mais il faut supposer toute une cascade de telles instabilités, barres ou spirales, à diverses échelles en rayon dans la galaxie. Des simulations numériques ont montré qu'une barre dans une galaxie exerçait un couple négatif, faisant arriver le gaz vers le centre, entre la corotation et la résonance interne de Lindblad. Les couples sont positifs et provoquent le mouvement de gaz inverse, en dehors de cet espace. Il faut donc une succession d'instabilités de ce genre, soit temporellement, soit spatialement. C'est en effet ce que montrent les simulations numériques : lorsque suffisamment de gaz s'est accumulé au centre, la cinématique de la galaxie en est changée, et il peut se découpler une barre secondaire, à l'intérieur de la première barre, qui va prolonger la chute du gaz vers le centre. Ces barres ont une corotation qui correspond à la résonance interne de Lindblad de la grande barre. Le diagnostic observationnel est facile à obtenir, car il y a formation d'étoiles accélérée à la résonance de Lindblad, ce qui forme un anneau brillant. Tout près du trou noir, les instabilités $m = 2$ de barres sont relayées par des instabilités $m = 1$ (un bras, décentrement), car les orbites deviennent képlériennes, et le potentiel dominé par la masse centrale du trou noir supermassif.

Cours 6 – Coévolution cosmique trous noirs/galaxies

Séminaire – Démographie des trous noirs

Eric Emsellem (ESO-Garching, Allemagne), le 11 janvier 2016

Ce cours se focalise sur la relation étroite entre masses des bulbes et masses des trous noirs, et donc sur la démographie des trous noirs. Cette relation est très bien vérifiée pour les fortes masses, mais elle est plus dispersée aux faibles masses. De même, les galaxies barrées font une exception, peut-être parce que les bulbes dans les galaxies barrées ne sont que des pseudo-bulbes, ou que la cinématique dans une galaxie barrée n'est pas circulaire, mais allongée. Les galaxies en interaction sont aussi des exceptions (fusions en cours). Récemment, des trous noirs trop massifs pour la relation ont été observés à grand *redshift*, au début de l'Univers. Se pourrait-il que les trous noirs croissent en masse plus vite que les bulbes, qui se rattraperaient ensuite ? Cette hypothèse semble étayée par le fait que des trous noirs trop massifs sont aussi observés dans les amas de galaxies, du moins pour les galaxies centrales d'amas. Celles-ci sont empêchées de former des étoiles, car le gaz intra-amas est chauffé à des températures supérieures au million de degrés par les interactions. La formation des bulbes est alors empêchée et ne peut rattraper celle des trous noirs. La relation entre les masses est interprétée comme un effet de rétroaction des AGN sur la formation d'étoiles. Même si l'AGN central a peu de volume d'action sur la galaxie, son énergie est largement suffisante pour détruire toute la galaxie. Le problème est alors celui du couplage entre l'énergie de l'AGN et la matière de la galaxie. Si la matière est éjectée perpendiculairement au plan de la galaxie, il n'y aura pas beaucoup de couplage. Dans de nombreux cas, toutefois, le disque d'accrétion n'a pas la même inclinaison que le disque galactique, et la matière éjectée par l'AGN peut entrer en collision avec la galaxie et modérer la formation d'étoiles. Il est possible que les quasars soient l'étape ultime d'une fusion entre deux galaxies spirales.

Cours 7 – Rétroaction des trous noirs sur la formation d'étoiles

Séminaire – Starbursts et noyaux actifs

David Elbaz (CEA, Saclay), le 18 janvier 2016

L'un des grands problèmes actuels de la démographie des trous noirs est de comprendre les phénomènes de rétroaction ou de *feedback* des AGN. Tout au long de l'Univers, l'histoire de la formation des étoiles est parallèle à la croissance de la masse des trous noirs. Est-ce un problème d'alimentation simultanée, ou de rétroaction, et celle-ci est-elle vraiment efficace, positive ou négative ? Pourtant, le petit nombre de galaxies très massives ne peut s'expliquer que par l'effet de rétroaction des AGN, soit la suppression de la formation des étoiles. Les simulations cosmologiques sans AGN *feedback* surestiment la fonction de masse des galaxies du côté des masses les plus élevées. Il existe deux modes de rétroaction : les vents venant du disque, pour les quasars non-radio, ou les jets radio, pour les autres, les moins fréquents et les moins lumineux. Le vent est émis par les quasars de forte accrétion et de luminosité proche d'Eddington, quand la pression de radiation compense, et au-delà la force de gravité. Des diagnostics de *feedback* efficaces sont observés notamment dans les amas de galaxies, où le gaz chaud intragalactique se refroidit et alimente un AGN dans la galaxie centrale. Le jet radio émet des bulles dans le gaz X, creuse des cavités, et modère le refroidissement du gaz et l'alimentation de l'AGN. Récemment, des flots de gaz moléculaire sont observés fréquemment dans des galaxies hôtes d'AGN et de flambées de formation d'étoiles. Les relations statistiques de leurs propriétés en énergie et moment montrent qu'ils sont conservateurs d'énergie plus que de moment, donc très efficaces pour repousser le gaz froid et stopper la formation d'étoiles. Les simulations montrent qu'il y a bien rétroaction, à la fois positive et négative.

Cours 8 – Fusion de galaxies et trous noirs binaires

Séminaire – Trous noirs binaires, théorie et simulations

Pau Amaro-Seoane (Potsdam, Allemagne), le 25 janvier 2016

Étant donné qu'un trou noir supermassif existe dans chaque galaxie à bulbe, lorsque celles-ci interagissent et coalescent par friction dynamique, on s'attend à la fusion des trous noirs respectifs, avec formation temporaire d'une binaire de trous noirs. En théorie, la fusion des trous noirs est difficile lorsqu'ils s'approchent à faible distance. À grande distance, les deux trous noirs perdent leur énergie orbitale, par friction dynamique sur les étoiles du bulbe des galaxies hôtes. Puis les étoiles ont toutes été éjectées et, théoriquement, il faudrait attendre un temps de relaxation (très long, car les étoiles sont pratiquement sans collision) pour retrouver des étoiles qui pourraient aider les trous noirs à perdre de l'énergie. En réalité, le gaz intervient dans cette étape et accélère le processus. Dans la dernière étape, les trous noirs sont si proches que les effets relativistes entrent en jeu, ils émettent des ondes gravitationnelles et se rapprochent très vite. Le problème est donc restreint à des distances inférieures au parsec et à des échelles de temps inférieures à 100 millions d'années. Le problème a été traité par des simulations numériques performantes, avec haute résolution spatiale. Du côté des observations, la détection de trous noirs binaires est très rare. Cela tendrait à prouver que l'efficacité de fusion est plus haute

que prévu. Les exemples à évidence directe se comptent sur les doigts de la main, mais il y a aussi de nombreuses évidences indirectes, dans la réorientation des jets radio, ou l'observation d'un grand nombre d'AGN binaires. À grand *redshift*, des trous noirs supermassifs sont observés en grand nombre, et l'on devrait pouvoir observer des trous noirs de masse intermédiaire, qui sont encore trop rares.

Cours 9 – Diagnostics observationnels, perspectives

Séminaire – Détection des ondes gravitationnelles

Tania Regimbau (OCA, Nice), le 1^{er} février 2016

Lors de la fusion de trous noirs – un phénomène très fréquent –, des ondes gravitationnelles sont émises, et leur détection se prépare depuis des années. Les ondes gravitationnelles sont des rides de l'espace-temps, des fluctuations de la courbure engendrées par le mouvement rapide des masses. Elles se propagent à la vitesse de la lumière, et ont deux polarisations possibles, à 45 degrés. Si les ondes électromagnétiques sont représentées par un dipôle oscillant, ici il s'agit d'un quadripôle. On sait que ces ondes existent, elles ont été détectées indirectement par R. A. Hulse et J. H. Taylor en 1975 (prix Nobel 1993), grâce au chronométrage de pulsars. Les pulsars les plus utiles pour ces mesures sont les pulsars millisecondes, en général des pulsars évolués, où le champ magnétique est affaibli, mais des pulsars rajeunis et accélérés par l'accrétion de gaz à partir d'une binaire. Leur durée de vie est alors bien plus longue. Le chronométrage des pulsars sont les mesures les plus précises en astrophysique. Un réseau de pulsars est en train d'être construit, pour pouvoir cartographier l'espace qui nous entoure, et détecter les fluctuations de courbure dues à la fusion de trous noirs supermassifs. Il sera alors possible de quantifier le nombre de fusions de trous noirs, même si ceux-ci ne sont pas des noyaux actifs, donc sans rayonnement électromagnétique. En février 2016 a été annoncée pour la première fois la détection des ondes gravitationnelles dues à la fusion de deux trous noirs, de masse stellaire (30Mo). Cette détection a pu être faite par LIGO, en collaboration avec l'instrument analogue européen Virgo. La mesure est établie par l'interférence d'ondes laser, voyageant sur des bras d'interféromètre de 4 km de longueur. Même multipliée par plusieurs réflexions (dans une cavité), cette longueur correspond à la longueur d'onde émise par les trous noirs stellaires. Pour commencer à détecter des trous noirs plus massifs, de longueur d'onde bien plus grande, il faudra aller dans l'espace (interféromètre LISA, Laser Interferometer Space Antenna).

RECHERCHE

Durant l'année académique 2015-2016, notre équipe a publié plusieurs résultats importants relatifs au *feedback* des trous noirs supermassifs au centre des galaxies. Ces trous noirs, lorsqu'ils sont actifs, comme dans les galaxies de Seyfert ou les quasars, fournissent une énergie considérable, qui est source d'éjection de plasmas (jets radio) mais qui peut également entraîner le gaz moléculaire de la galaxie, et produit des *outflows* moléculaires, freinant la formation stellaire. Nous avons étudié ces éjections dans N1433, N1068 et dans N1377, où le jet, de façon surprenante, change d'orientation en fonction de la distance au centre. Une première interprétation

a été fournie en termes de précession du disque nucléaire collimatant le jet (Aalto *et al.*, 2016). Les masses de gaz moléculaire éjectées s'échelonnent sur un grand domaine, de quelques masses solaires par an à quelques centaines, permettant d'estimer leur effet réducteur sur la formation d'étoiles. Parfois, l'activité du trou noir central peut avoir un effet positif sur la formation d'étoiles, en comprimant le gaz neutre sur son passage. Ce phénomène a été mis en évidence sur la galaxie proche Centaurus A (ou galaxie Hamburger). Dans le halo de cette galaxie, le gaz atomique HI provenant des débris d'un compagnon englouti forme des coquilles autour du centre. Lors du passage du jet, le gaz atomique est comprimé et se transforme en gaz moléculaire (Salomé *et al.*, 2016). C'est la première fois que ce changement de phase est observé dans le sillage d'un jet radio et montre l'évidence du *feedback* positif.

Grâce à la grande sensibilité et la haute résolution angulaire de l'interféromètre ALMA, nous avons pu pour la première fois montrer l'existence d'un tore moléculaire dans une galaxie de Seyfert 2. Les tores moléculaires sont suspectés d'être présents pour obscurcir l'activité du trou noir supermassif dans les galaxies de Seyfert 2, qui n'ont pas de BLR, comme les Seyfert 1. Notre carte ALMA a pu montrer que le tore avait un rayon de 7 parsecs, tout à fait compatible avec la théorie (Garcia-Burillo *et al.*, 2016). Une série d'observations de tores moléculaires est aujourd'hui programmée par notre équipe avec ALMA, afin d'en déduire des caractéristiques des tores, de façon plus statistique.

Pour la première fois, ALMA nous a permis d'observer, grâce à l'absorption de la molécule CO, l'accrétion de gaz par un trou noir au centre d'un amas de galaxies sujet à flot de refroidissement (Tremblay *et al.*, 2016). Jusqu'à présent, nous avons essentiellement observé l'émission de CO traçant le gaz moléculaire, dans des filaments pourvus de faible vitesse, pouvant avoir les deux sens, *inflow* ou *outflow*. La présence d'absorption uniquement décalée vers le rouge, devant la source radio du centre de l'amas, nous démontre qu'il s'agit bien d'accrétion de gaz, alimentant le trou noir. Au centre des amas, le gaz très chaud (millions de degrés) peut se refroidir, grâce à sa forte densité, perd son support de pression, et coule vers le centre de l'amas (flot de refroidissement). Le trou noir central est ainsi alimenté en permanence, et réagit avec un jet radio, qui, à son tour, modère le refroidissement, en chauffant le gaz. Nous avons observé et mis en évidence ce cycle de rétroaction, permettant de mieux comprendre la durée de vie de ces phénomènes.

En décembre 2015, Jonathan Freundlich, ATER de la chaire, a soutenu sa thèse sur la formation d'étoiles cosmique, et la dynamique des galaxies : il a participé au consortium PHIBSS (Plateau de Bure High-z Blue Sequence Survey) sur l'interféromètre de l'IRAM (Institut de radioastronomie millimétrique), et a montré des relations importantes entre densité de surface du gaz et de formation d'étoiles dans les galaxies lointaines (relation de Kennicutt-Schmidt résolue). Il a publié des simulations numériques sur la formation des filaments cosmiques, et montré par des simulations l'influence des baryons sur la matière noire, dans les galaxies à formation d'étoiles soutenue. L'énergie déployée produit une turbulence et une relaxation violente du système dynamique, qui peut chauffer le centre de la matière noire, et supprimer les cuspidés, qui sont un des problèmes essentiels du modèle cosmologique standard LCDM.

PUBLICATIONS

TREMBLAY G.R., OONK J.B.R., COMBES F., SALOMÉ P., O'DEA C.P., BAUM S.A., VOIT G.M., DONAHUE M., MCNAMARA B.R., DAVIS T.A., McDONALD M.A., EDGE A.C., CLARKE T.E., GALVÁN-MADRID R., BREMER M.N., EDWARDS L.O.V., FABIAN A.C., HAMER S., LI Y., MAURY A., RUSSELL H.R., QUILLEN A.C., URRY C.M., SANDERS J.S. et WISE M.W., « Cold, clumpy accretion onto an active supermassive black hole », *Nature*, vol. 534, n° 7606, 2016, p. 218-221, DOI : 10.1038/nature17969 [arXiv :1606.02304].

GARCÍA-BURILLO S., COMBES F., RAMOS ALMEIDA C., USERO A., KRIPS M., ALONSO-HERRERO A., AALTO S., CASASOLA V., HUNT L.K., MARTÍN S., VITI S., COLINA L., COSTAGLIOLA F., ECKART A., FUENTE A., HENKEL C., MÁRQUEZ I., NERI R., SCHINNERER E., TACCONI L.J. et VAN DER WERF P.P., « ALMA resolves the torus of NGC 1068 : Continuum and molecular line emission », *The Astrophysical Journal*, vol. 823, n° 1, 2016, L12, DOI : 10.3847/2041-8205/823/1/L12 [arXiv :1604.00205].

HAMER S.L., EDGE A.C., SWINBANK A.M., WILMAN R.J., COMBES F., SALOMÉ P., FABIAN A.C., CRAWFORD C.S., RUSSELL H.R., HLAVACEK-LARRONDO J., MCNAMARA B.R. et BREMER M.N., « Optical emission line nebulae in galaxy cluster cores 1: the morphological, kinematic and spectral properties of the sample », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 460, n° 2, 2016, p. 1758-1789, DOI : 10.1093/mnras/stw1054 [arXiv:1603.03047].

GÓMEZ A., DI MATTEO P., STEFANOVITCH N., HAYWOOD M., COMBES F., KATZ D. et BABUSIAUX C., « A new look at the kinematics of the bulge from an N -body model », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 589, 2016, A122, DOI : 10.1051/0004-6361/201527606 [arXiv:1602.06587].

RUSSELL H.R., MCNAMARA B.R., FABIAN A.C., NULSEN P.E.J., EDGE A.C., COMBES F., MURRAY N.W., PARRISH I.J., SALOMÉ P., SANDERS J.S., BAUM S.A., DONAHUE M., MAIN R.A., O'CONNELL R.W., O'DEA C.P., OONK J.B.R., TREMBLAY G., VANTYGHM A.N. et VOIT G.M., « ALMA observations of cold molecular gas filaments trailing rising radio bubbles in PKS 0745-191 », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 458, n° 3, 2016, p. 3134-3149, DOI : 10.1093/mnras/stw409 [arXiv:1602.05962].

CURRAN S.J., ALLISON J.R., WHITING M.T., SADLER E.M., COMBES F., PRACY M.B., BIGNELL C. et ATHREYA R., « A search for H i and OH absorption in $z \geq 3$ CO emitters », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 457, n° 4, 2016, p. 3666-3677, DOI : 10.1093/mnras/stw089.

SALOMÉ Q., SALOMÉ P., COMBES F., HAMER S. et HEYWOOD I., « Star formation efficiency along the radio jet in Centaurus A », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 586, 2016, A45, DOI : 10.1051/0004-6361/201526409 [arXiv:1511.04310].

AALTO S., COSTAGLIOLA F., MULLER S., SAKAMOTO K., GALLAGHER J.S., DASYRA K., WADA K., COMBES F., GARCÍA-BURILLO S., KRISTENSEN L.E., MARTÍN S., VAN DER WERF P., EVANS A.S. et KOTILAINEN J., « A precessing molecular jet signaling an obscured, growing supermassive black hole in NGC 1377? », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 590, 2016, A73, DOI : 10.1051/0004-6361/201527664 [arXiv:1510.08827].

SCHARWÄCHTER J., COMBES F., SALOMÉ P., SUN M. et KRIPS M., « The overmassive black hole in NGC 1277: New constraints from molecular gas kinematics », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 457, n° 4, 2016, p. 4272-4284, DOI : 10.1093/mnras/stw183.

MELCHIOR A.-L. et COMBES F., « Dense gas tracing the collisional past of Andromeda. An atypical inner region? », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 585, 2016, A44, DOI : 10.1051/0004-6361/201526257 [arXiv:1504.00863].

SALOMÉ Q., SALOMÉ P., COMBES F., HAMER S. et HEYWOOD I., « Star formation efficiency in the outer filaments of Centaurus A », in MARTINS F., BOISSIER S., BUAT V., CAMBRÉSY L. et PETIT P. (dir.), *SF2A-2015: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, 2015, p. 445-447.

SALOMÉ Q., SALOMÉ P., COMBES F. et HAMER S., « AGN feedback and jet-induced star formation », in MARTINS F., BOISSIER S., BUAT V., CAMBRÉSY L. et PETIT P. (dir.), *SF2A-2015: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, 2015, p. 441-443.

PANDEY-POMMIER M., VAN WEEREN R.J., OGREAN G.A., COMBES F., JOHNSTON-HOLLITT M., RICHARD J., BAGCHI J., GUIDERDONI B., JACOB J., DWARAKANATH K.S., NARASIMHA D., EDGE A., EBELING H., CLARKE T.E. et MROCKOWSKI T., « A Steep spectrum radio halo in merging galaxy cluster- MACSJ0416.1-2403 », in MARTINS F., BOISSIER S., BUAT V., CAMBRÉSY L. et PETIT P. (dir.), *SF2A-2015: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, 2015, p. 247-252.

RENAUD F., BOURNAUD F., EMMELM E., AGERTZ O., ATHANASSOULA E., COMBES F., ELMGREEN B., KRALJIC K., MOTTE F. et TEYSSIER R., « Environmental regulation of cloud and star formation in galactic bars », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 454, n° 3, 2015, p. 3299-3310, DOI : 10.1093/mnras/stv2223 [arXiv:1509.06567].

RANDRIAMAMPANDRY T.H., COMBES F., CARIGNAN C. et DEG N., « Estimating non-circular motions in barred galaxies using numerical N-body simulations », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 454, n° 4, 2015, p. 3743-3759, DOI : 10.1093/mnras/stv2147.

HUNT L.K., GARCÍA-BURILLO S., CASASOLA V., CASELLI P., COMBES F., HENKEL C., LUNDGREN A., MAIOLINO R., MENTEN K.M., TESTI L. et WEISS A., « Molecular depletion times and the CO-to-H₂ conversion factor in metal-poor galaxies », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 583, 2015, A114, DOI : 10.1051/0004-6361/201526553 [arXiv:1509.04870].

IODICE E., COCCATO L., COMBES F., DE ZEEUW T., ARNABOLDI M., WEILBACHER P.M., BACON R., KUNTSCHNER H. et SPAVONE M., « Mapping the inner regions of the polar disk galaxy NGC 4650A with MUSE », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 583, 2015, A48, DOI : 10.1051/0004-6361/201526446 [arXiv:1509.01112].

SMAJIC S., MOSER L., ECKART A., BUSCH G., COMBES F., GARCÍA-BURILLO S., VALENCIA-S. M. et HORROBIN M., « The nuclear gas disk of NGC 1566 dissected by SINFONI and ALMA », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 583, 2015, A104, DOI : 10.1051/0004-6361/201424850 [arXiv:1508.02664].

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

AALTO S., MARTÍN S., COSTAGLIOLA F., GONZÁLEZ-ALFONSO E., MULLER S., SAKAMOTO K., FULLER G.A., GARCÍA-BURILLO S., VAN DER WERF P., NERI R., SPAANS M., COMBES F., VITI S., MÜHLE 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 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 584, 2015, A42, DOI : 10.1051/0004-6361/201526410 [AO : CaltechAUTHORS:20160115-163113572].

COMBES F., « ALMA Synergy with ATHENA », in EHLE M. (dir.), *Exploring the Hot and Energetic Universe: The first scientific conference dedicated to the Athena X-ray observatory*, Madrid, 2015, [page des actes : <https://www.cosmos.esa.int/web/conferences-archive/athena-2015>], id. 30, https://www.cosmos.esa.int/documents/946106/1024226/FCombes_t.pdf/d2aa3030-987d-4879-b865-5b5f4ebac2c5.

COMBES F., « Les galaxies », *L'Astronomie*, vol. 130, n° 8, 2016, p. 14-19.

COMBES F., « Star formation and its triggers », *The Interplay between Local and Global Processes in Galaxies*, 2016.

COMBES F., « The Square Kilometer Array: cosmology, pulsars and other physics with the SKA », *Journal of Instrumentation*, 2015, vol. 10, n° 9, C09001, DOI : 10.1088/1748-0221/10/09/C09001 [arXiv:1504.00493].

- COMBES F., « Explaining the formation of bulges with MOND », in LAURIKAINEN E., PELETIER R. et GADOTTI D. (dir.), *Galactic Bulges*, Springer International Publishing, coll. « Astrophysics and Space Science Library », 2016, p. 413-428, DOI : 10.1007/978-3-319-19378-6_15 [arXiv:1501.03603].
- DASYRA K.M., BOSTROM A.C., COMBES F. et VLAHAKIS N., « A radio jet drives a molecular and atomic gas outflow in multiple regions within one square kiloparsec of the nucleus of the nearby galaxy IC5063 », *The Astrophysical Journal*, vol. 815, n° 1, 2015, 34, DOI : 10.1088/0004-637X/815/1/34 [arXiv:1503.05484].
- DESSAUGES-ZAVADSKY M., ZAMOJSKI M., SCHAEERER D., COMBES F., EGAMI E., SKLIAS P., SWINBANK M.A., RICHARD J. et RAWLE T., « New emerging results on molecular gas, stars, and dust at $z \sim 2$, as revealed by low star formation rate and low stellar mass star-forming galaxies », in KAVIRAJ S. (dir.), *Galaxies at High Redshift and their Evolution Over Cosmic Time*, vol. 11, n° 319, 2016, p. 88-91, DOI : 10.1017/S1743921315009874.
- D'ONOFRIO M., RAMPAZZO R., ZAGGIA S., LONGAIR M.S., FERRARESE L., MARZIANI P., SULENTIC J.W., VAN DER KRUIT P.C., LAURIKAINEN E., ELMEGREEN D.M., COMBES F., BERTIN G., FABBIANO G., GIOVANELLI R., CALZETTI D., MOSS D.L., MATTEUCCI F., DJORGOVSKI S.G., FRAIX-BURNET D., GRAHAM A.W.M. et TULLY B.R., « The anatomy of galaxies », in: *From the Realm of the Nebulae to Populations of Galaxies*, Springer International Publishing, coll. « Astrophysics and Space Science Library », n° 435, 2016, p. 243-379, DOI : 10.1007/978-3-319-31006-0_4.
- D'ONOFRIO M., ZAGGIA S., RAMPAZZO R., VALLENARI A., GILMORE G.F., MARZIANI P., STIAVELLI M., CALZETTI D., BIANCHI L., TRINCHIERI G., BROMM V., BLAND-HAWTHORN J., KAIFU N., COMBES F., MOSS D.L. et PATUREL G., « New eyes for galaxies investigation », in: *From the Realm of the Nebulae to Populations of Galaxies*, Springer International Publishing, coll. « Astrophysics and Space Science Library », n° 435, 2016, p. 697-737, DOI : 10.1007/978-3-319-31006-0_9.
- LABIANO A., GARCÍA-BURILLO S., COMBES F., USERO A., SORIA-RUIZ R., PIQUERAS LÓPEZ J., TREMBLAY G., HUNT L., FUENTE A., NERI R. et OOSTERLOO T., « AGN feedback and star formation in young and old radio galaxies », *Astronomische Nachrichten*, vol. 337, n° 1-2, 2016, p. 188-193, DOI : 10.1002/asna.201512289.
- PRIMAS F., MADDISON S., PRIMAS F., AERTS C., CLAYTON G., COMBES F., ELMEGREEN D., FERETTI L., JOG C., KOBAYASHI C., LAZZARO D., LIANG Y., MANDRINI C., MATHEWS B. et ROVIRA M., « Executive committee working group: Women in astronomy », *Transactions of the International Astronomical Union, Series A*, vol. 29, 2016, p. 531-538, DOI : 10.1017/S1743921316000995.
- RAMPAZZO R., D'ONOFRIO M., ZAGGIA S., DJORGOVSKI S.G., ELMEGREEN D.M., POGGIANTI B.M., CALZETTI D., COMBES F., LONGAIR M.S. et BROMM V., « In pursuit of high redshift galaxies », in: *From the Realm of the Nebulae to Populations of Galaxies*, Springer International Publishing, coll. « Astrophysics and Space Science Library », n° 435, 2016, p. 479-508, DOI : 10.1007/978-3-319-31006-0_6.
- RAMPAZZO R., D'ONOFRIO M., ZAGGIA S., LATTIS J.M., HAYNES M.P., GIOVANELLI R., KARACHENTSEVA V., LONGAIR M.S., LINDBLAD P.-O., RENZINI A., DE CARVALHO R.R., KAIFU N., BLAND-HAWTHORN J., DJORGOVSKI S.G., BIANCHI L., CALZETTI D., FABBIANO G., COMBES F., CHIOSI C. et SULENTIC J.W., « Extragalactic Astronomy: From Pioneers to Big Science », in: *From the Realm of the Nebulae to Populations of Galaxies*, Springer International Publishing, coll. « Astrophysics and Space Science Library », n° 435, 2016, p. 1-92, DOI : 10.1007/978-3-319-31006-0_1.

