

Annuaire du Collège de France

122^e année

2021
2022

Résumé des cours et travaux



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

GALAXIES ET COSMOLOGIE

Françoise Combes

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

La série de cours « Les phénomènes variables en astrophysique : des sursauts gamma aux blazars » est disponible en audio et en vidéo sur le site internet du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/cours/les-phenomenes-variables-en-astrophysique-des-sursauts-gamma-aux-blazars>), ainsi que la série de séminaires qui lui est associée (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/seminaire/les-phenomenes-variables-en-astrophysique-des-sursauts-gamma-aux-blazars>).

COURS ET SÉMINAIRE - LES PHÉNOMÈNES VARIABLES EN ASTROPHYSIQUE

L'Univers autour de nous n'est pas immuable, comme le croyaient les anciens, avec la sphère des fixes. Des étoiles explosent, en nova ou supernova, certaines étoiles varient périodiquement ou non, et un grand nombre de phénomènes ont progressivement été découverts, à diverses longueurs d'onde. En radio, la découverte des pulsars, des étoiles à neutrons qui tournent sur elles-mêmes de 1 à 1 000 fois par seconde, a fait croire à des signaux envoyés par des extraterrestres. Les noyaux actifs de galaxies font preuve d'une grande variabilité. En règle générale, tous les phénomènes qui varient sur une échelle de temps donnée « t » se produisent sur des régions plus petites que « ct » (produit de la vitesse de la lumière c par le temps t), ce qui permet de découvrir des événements qui ne nous sont pas accessibles à cause d'une résolution spatiale trop faible. Suivre les variations journalières d'un noyau actif de galaxies

nous permet d'atteindre des résolutions de l'ordre du jour-lumière, à des distances cosmologiques de milliards d'années-lumière! Des phénomènes extrêmement variables, de durée souvent inférieure à la seconde jusqu'à quelques minutes, ont été découverts en rayon gamma (les sursauts gamma) et, de même, des phénomènes semblables en radio, les sursauts radio rapides. Même si ces sursauts sont relativement rares dans notre voisinage, la sensibilité des télescopes permet de les détecter à des distances cosmologiques, et le volume considéré est immense, si bien que nous pouvons détecter plus d'un sursaut gamma par jour.

COURS 1 - PHÉNOMÈNES VARIABLES SUR DIFFÉRENTES ÉCHELLES

Le 22 novembre 2021

Dans cette première séance, les différents phénomènes variables sont introduits : d'abord les étoiles variables, périodiques ou non, comme les RR-Lyrae, les Céphéides, les pulsars. La source de leur variation ou pulsation est multiple : outre les binaires à éclipses ou non, il peut y avoir la convection turbulente, comme le Soleil, ou les modes de gravité (Mira, Céphéides), ou encore les modes acoustiques (naines blanches pulsantes). Dans un amas globulaire d'étoiles, plusieurs varient en luminosité dans une nuit, l'amas ressemble à un sapin de Noël! Il existe aussi les explosions d'étoiles, qui détruisent la source : les supernovae SN II (et aussi SN Ib, SN Ic) qui correspondent à l'effondrement du cœur d'une jeune étoile massive, à la fin de sa vie; le Crabe en est un exemple. On trouve aussi les SN Ia, qui sont des binaires, avec une naine blanche qui accrète de la matière de son compagnon. La source est donc une étoile ordinaire, vieille et peu massive. La plus grande luminosité des SN Ia permet de les détecter à des distances cosmologiques, et ce sont les chandelles standard, qui ont permis de découvrir l'énergie noire. Les noyaux actifs (AGN) sont parmi les sources lointaines brillantes les plus variables. Lorsque le trou noir émet un jet dirigé vers l'observateur, la luminosité est considérablement amplifiée et la variabilité raccourcie en durée, ce sont les blazars, variables des gamma à la radio, et de la seconde à l'année. Plus près de nous, dans la Voie lactée, les micro-quasars et autres binaires X contenant un objet compact, étoile à neutrons ou trou noir, sont des AGN en miniature, avec des durées de variation bien plus courtes, à taille humaine. Enfin, il y a les sursauts gamma GRB (*gamma ray bursts*) et les sursauts radio FRB (*fast radio bursts*), encore mystérieux. Certains sont dus à des explosions d'hypernovae, d'autres à la fusion d'objets compacts. Le télescope Véra Rubin au Chili va bientôt entrer en opération. Il est dédié aux objets variables, il va en détecter des millions chaque nuit, et donnera l'alerte pour un suivi avec d'autres télescopes. Nous discutons la physique de tous ces phénomènes dans les cours suivants.

SÉMINAIRE 1 - LE CIEL VARIABLE : TÉLESCOPE VÉRA RUBIN

Pierre Antilogus (Sorbonne Université), le 22 novembre 2021

COURS 2 - NOYAUX ACTIFS VARIABLES : BLAZARS

Le 29 novembre 2021

Un blazar est un noyau actif de galaxies (AGN) dont le disque d'accrétion est vu quasi de face; ainsi, les éjections de matière, vent, flot et jet radio, qui sont perpendiculaires, viennent directement vers nous. L'orientation du jet relativiste le long de la ligne de visée est à l'origine de vitesses superluminiques, illusion due au fait que le rayonnement des particules dans le jet se propage à une vitesse comparable à celle du jet. La variabilité est ainsi accrue, et la luminosité aussi. Le paramètre Doppler relativiste peut atteindre plusieurs centaines, et le flux de la source peut être amplifié de plusieurs millions. On conçoit alors que toutes les sources gamma provenant d'AGN sont des blazars. Plus rarement, des neutrinos ont été détectés provenant de blazars, grâce au télescope à neutrinos Ice Cube, dans l'Antarctique. Le neutrino interagit avec la glace et donne e^- , μ , τ et des photons par effet Cherenkov. Pour les séparer des neutrinos atmosphériques, il est possible de détecter l'interaction avec l'atmosphère de rayons cosmiques qui forment des gerbes et, dans la glace, une lumière Cherenkov, avec une direction différente des neutrinos extragalactiques. Le rayonnement des blazars provient de l'émission synchrotron à toute longueur d'onde, *i.e.* l'émission des électrons relativistes accélérés tournant dans un champ magnétique intense. On distingue deux catégories de blazars, les HBL, plus lumineux, à spectre plus plat, et les LBL, moins lumineux, à spectre pentu. Une grande partie de la différence serait due à l'orientation. À haute énergie, le rayonnement SSC (*synchrotron self-Compton*) crée une deuxième bosse dans le spectre : les électrons relativistes donnent de l'énergie aux photons synchrotron, par effet Compton, pour donner des X et des gamma. Les blazars sont aussi la source de l'accélération de particules, les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie ou UHECR. Plusieurs mécanismes comme l'accélération dans les chocs et par reconnexion magnétique sont à l'œuvre, mais la détection de rayons à 10^{20} eV pose problème.

SÉMINAIRE 2 - VARIABILITÉ EN RAYONS X DES NOYAUX ACTIFS DE GALAXIES

Delphine Porquet (CNRS), le 29 novembre 2021

COURS 3 - CARTES DE RÉVERBÉRATION ET BINAIRES

Le 6 décembre 2021

Une technique pour mesurer précisément la masse des trous noirs supermassifs au centre des galaxies est la variabilité, qui permet d'utiliser la résolution temporelle pour compenser le manque de résolution spatiale. Lorsque l'AGN reçoit une quantité de matière variable, sa luminosité varie; son rayonnement est réfléchi sur le disque d'accrétion et la région de raies larges (BLR), et la mesure du temps de retard des variations réfléchies permet d'en déduire la taille de la BLR, le rayonnement se propageant à la vitesse de la lumière. La mesure du spectre de la BLR, très large (10000 km/s ou plus), permet de déduire la vitesse de rotation de la matière autour du trou noir. Si l'on connaît aussi la distance au centre, cette mesure permet alors de déduire la masse du trou noir. Après des douzaines de telles mesures de réverbération, une relation d'échelle a été obtenue, liant la luminosité de l'AGN au carré de la taille de la BLR. Ainsi, cette relation permet de déduire la masse des trous noirs, avec seulement la mesure de la luminosité de l'AGN et du spectre de la BLR. Les binaires X sont des exemples d'AGN en miniature, et leur observation permet plus facilement de comprendre les mécanismes, étant donné que leur variabilité se produit sur des échelles de temps bien plus courtes. Ainsi, on a pu déterminer comment la pression de radiation épaissit le disque d'accrétion, et comment les variations quasi périodiques (QPO) permettent d'identifier la dernière orbite stable du gaz qui va alimenter le trou noir (ISCO). Les sources ULX (ultra-lumineuses en X) ont une luminosité d'Eddington correspondant à un trou noir de masse intermédiaire, et ont longtemps été considérées comme le meilleur espoir d'en détecter. Pourtant, certaines ont révélé des pulses périodiques : ce sont en fait des pulsars, qui rayonnent beaucoup plus que leur limite d'Eddington. Le centre de notre Galaxie possède un trou noir assez peu massif, et il n'est pas actif (10^{-9} Eddington). Cependant, il existe des vestiges d'une activité récente, des jets radio, X, et aussi les bulles de Fermi.

SÉMINAIRE 3 - LE CENTRE GALACTIQUE

Régis Terrier (CNRS), le 6 décembre 2021

COURS 4 - LES NOYAUX QUI CHANGENT DE LOOK

Le 13 décembre 2021

Les AGN sont depuis longtemps classifiés en deux catégories, les types 1 et 2. Les AGN de type 1 sont plus lumineux, possèdent des raies larges (des BLR) en plus des raies étroites (NLR). Les types 2, moins lumineux, ne montrent pas de BLR, mais uniquement des NLR. Les raies de BLR sont surtout celles de l'hydrogène, ce sont des raies permises, qui ne dépendent pas de la densité, alors que les NLR sont en plus des

raies interdites ([NII], [OIII], etc.) qui n'existent que dans les milieux dilués. Le paradigme d'unification des AGN propose que les types 2 soient les mêmes que les autres, mais ils souffrent d'extinction par la poussière, à cause d'une orientation davantage par la tranche de leur disque d'accrétion. Cette hypothèse est bien vérifiée pour certains AGN de type 2, dont la lumière polarisée révèle une BLR, 100 fois plus faible, par réflexion sur la poussière. Toutefois, il existe aussi des différences intrinsèques entre les deux types, et tous ne peuvent pas être expliqués par l'orientation sur la ligne de visée. Ceci est démontré par les AGN qui « changent de look » (*changing-look galaxy*), qui passent de type 1 à type 2 et inversement en quelques années, ou dizaines d'années. Les causes de ces changements ont été recherchées parmi le passage d'un nuage obscurcissant devant le noyau – mais les rayons X ne sont pas obscurcis – ou par la précession d'un disque proche du centre. Mais la vraie source du changement, à toutes les longueurs d'onde, se révèle dans le taux d'alimentation du trou noir central. La chute du gaz sur le disque d'accrétion est intermittente, et des paquets, ou *clumps*, peuvent relancer l'activité de type 1 dans quelques dizaines d'années. Il est possible de simuler numériquement ces « changements de look ». Il est aussi possible, dans certains cas, que le changement soit dû à la destruction d'une étoile par le trou noir, un TDE (*tidal disruption event*). Ces événements sont toutefois relativement rares et ont une courbe de lumière relativement reconnaissable dans le temps.

SÉMINAIRE 4 - NOYAUX ACTIFS CHANGEANTS

Frédéric Marin (université de Strasbourg), le 13 décembre 2021

COURS 5 - LES DESTRUCTIONS D'ÉTOILES (TDE)

Le 10 janvier 2022

Une étoile qui s'approche trop près du trou noir (BH) central peut être détruite, et ce de façon violente (TDE). Déjà, en 1975, Hill avait calculé tous les rayons caractéristiques relevant de ces phénomènes. Il y a d'abord le rayon de marée, bien sûr, mais aussi le rayon d'Eddington, où la pression de radiation du BH dépasse la limite d'Eddington de l'étoile. Celle-ci voit alors son enveloppe soufflée, l'étoile est enflée et fragilisée. Il y a aussi le rayon de collision, lorsque la vitesse orbitale de l'étoile devient égale à la vitesse d'échappement à la surface de l'étoile, ainsi l'étoile perd son enveloppe; enfin, le rayon d'accrétion, où le BH domine la dynamique. L'énergie pour détruire l'étoile est prise sur l'énergie orbitale. L'étoile prend d'abord une forme de crêpe, puis le gaz s'étale par les forces de marée, avant de dissiper son énergie et d'être avalé par le trou noir. Les étoiles détruites sont celles qui avaient le plus petit moment angulaire. Assez vite, la distribution stellaire est tronquée pour les petits moments angulaires, et peu d'étoiles tombent sur le BH; il faut repeupler le cône de perte, par relaxation, et cela prend des milliards d'années.

La courbe de lumière d'un TDE a été prédite par des simulations numériques, la décroissance en temps est une loi de puissance d'exposant $-5/3$, très reconnaissable. Quelques observations ont pu confirmer ce genre d'événements. On attend dans la Voie lactée un TDE tous les 10000 ans. Le taux de TDE est fortement augmenté dans les fusions de galaxies, car la matière et les moments angulaires sont re-brassés au hasard. Elles interviennent surtout pour les galaxies de grande masse. Aujourd'hui, 56 TDE ont été confirmées. Dans 10 % des cas, ils sont accompagnés de jets radio. Les sursauts durent plusieurs jours, les débris collisionnent entre eux et tombent sur le BH, quoique le processus soit ralenti par la précession relativiste. Il est possible que cette retombée donne lieu à des QPO (oscillations quasi périodiques).

SÉMINAIRE 5 - LES ÉVÉNEMENTS VIOLENTS

Fabien Casse (Université Paris Cité), le 10 janvier 2022

COURS 6 - SURSAUTS RADIO RAPIDES (FRB) : OBSERVATIONS

Le 17 janvier 2022

De même que Jocelyn Bell, en 1967, a découvert par hasard les pulsars alors qu'elle cherchait les effets de scintillation des quasars récemment découverts, les FRB ont été découverts par hasard dans les années 2000. Ils auraient pu être découverts bien avant, mais les radioastronomes étaient habitués avec les pulsars à rechercher des objets variables périodiques. Tant que l'on ne connaît pas la période de variation, on applique pour la découvrir une transformation de Fourier rapide (FFT), qui effectue le spectre en fréquence du signal. Les FFT avaient été découvertes en 1969, peu après la découverte des pulsars, et plus personne ne regardait directement la série temporelle des signaux provenant du télescope. La FFT avait aussi permis de détecter plusieurs fréquences dans le spectre, ainsi que la découverte du pulsar binaire par Hulse & Taylor en 1975. Maura McLaughlin, en 2006, trouve dans le survey de pulsars de Parkes des sources *rotating radio transients* ou RRAT, avec des pulses de quelques millisecondes, espacés de plusieurs minutes ou heures. Le télescope de 64 mètres de diamètre de Parkes en Australie avait un récepteur *multi-beams*, qui permettait de trier les sources par coïncidence. Grâce à la mesure de dispersion (DM), il était possible de déduire la distance des sources. Sur la ligne de visée, les électrons diffusent la lumière, qui n'a pas la même vitesse que dans le vide. Sa vitesse dépend de la fréquence. Le signal basse fréquence arrive plus tard par rapport aux fréquences hautes. La mesure de cette dispersion donne la distance, en supposant une densité électronique moyenne. D'après les données du télescope de Parkes, on se rend compte que les RRAT sont dans la Voie lactée. Les astronomes s'aperçoivent alors qu'ils ont sans doute manqué des objets, avec la FFT. Après une recherche fébrile dans les archives et l'élimination des interférences, ou des objets terrestres (dispersion

nulle), a été découvert en 2007 l'objet de Lorimer, observé en fait en 2001. D'après sa grande DM, il est extragalactique, et donc très puissant ! L'événement ne se reproduit pas en 90 heures d'observation : est-ce une supernova ou la fusion d'objets compacts ? Entretemps, Burke-Spolaor et son équipe font part en 2011 de la découverte de 16 pulses (les perytons), semblables au sursaut de Lorimer, mais qui doivent être d'origine terrestre, car ils se retrouvent dans les 13 *beams* du récepteur. Cela jette un doute sur la réalité du sursaut de Lorimer. En 2013 toutefois, 13 sursauts FRB, du même type que celui de Lorimer, avec des DM différents, viennent le confirmer. Ils sont tellement fréquents que l'on extrapole la détection possible de 7000 FRB par jour, si l'on pouvait regarder tout le ciel. En 2015, le mystère des perytons est résolu : lors de l'ouverture prématurée d'un micro-onde, le magnétron envoie un signal pendant quelques millisecondes. Les perytons survenaient seulement aux heures de bureau ! Aujourd'hui, grâce au télescope CHIME à grand champ (qui n'avait pas été construit pour cela), un très grand nombre de FRB ont été détectés, et quelques-uns se répètent. Avec le radiotélescope SKA et ses précurseurs, la science des FRB est en train de progresser à grande vitesse !

SÉMINAIRE 6 - LES NOUVEAUX RADIO-TÉLESCOPES

Philippe Zarka (Observatoire de Paris), le 17 janvier 2022

COURS 7 - SURSAUTS RADIO RAPIDES (FRB) : THÉORIES

Le 31 janvier 2022

Quelles sont les sources à l'origine des FRB ? Au début de la décennie, nous avons 800 FRB détectés, dont 24 répéteurs, et avons identifié 19 galaxies hôtes. Un seul FRB a été détecté dans la Voie lactée : SGR 1935, un sursaut gamma mou et répéteur, qui semble être une étoile à neutrons extrêmement magnétisée, appelée « magnétar ». Vu les durées très courtes, les sources de FRB doivent de toutes façons être des objets compacts, trous noirs ou étoiles à neutrons. Ceux qui ne se répètent pas peuvent être cataclysmiques : soit explosion d'une étoile, soit fusion de deux objets compacts. Quels sont les mécanismes d'émission ? Il s'agit sans nul doute d'émission synchrotron. Au vu de la forte intensité des flux observés, et surtout des faibles tailles des régions émettrices, déduites de la variabilité, les températures de brillance seraient de l'ordre de 10^{36} K. Or même une émission non thermique comme le synchrotron ne peut dépasser $T_B \sim 10^{12}$ K ; au-delà, la température est limitée par la catastrophe Compton inverse. On peut donc en déduire qu'il s'agit d'une émission cohérente. Ce genre d'émission pourrait provenir de particules chargées à la même vitesse, formant un groupe/paquet. Ces courants créent un champ magnétique ; il existe un champ électrique parallèle au champ magnétique B qui accélère les particules le long des lignes de champ B , produisant une émission de courbure. Ce rayon-

nement de courbure cohérent peut survenir dès que $B > 10^{14}$ G, ce qui est le cas des magnétars. Il peut exister aussi des masers synchrotron, produisant des émissions cohérentes. Les propositions à l'origine des FRB sans répétition sont l'effondrement d'une étoile à neutrons (blitzar), la fusion de deux étoiles à neutrons ou la fusion de deux naines blanches, les supernovae ou l'évaporation d'un trou noir. Pour les répéteurs, les mécanismes sont les sursauts de magnétar ou les pulses géants d'étoiles à neutrons. Ces modèles sont compatibles avec les observations, par exemple l'observation du triste trombone selon laquelle, au cours du sursaut, l'émission dérive dans le temps vers les basses fréquences.

SÉMINAIRE 7 - LES MAGNÉTARS

Jérôme Petri (université de Strasbourg), le 31 janvier 2022

COURS 8 - SURSAUTS GAMMA (GRB) : OBSERVATIONS

Le 7 février 2022

Les GRB ont été découverts en 1967-1973 par des satellites militaires. La série de satellites Vela, lancée par les États-Unis, avait pour but de vérifier l'application du traité de non-développement des essais nucléaires (1963). Ces satellites ont détecté des rayons gamma, X, des neutrons et des rayons cosmiques (CR), à 137 000 km d'altitude. Klebesadel et son équipe, en 1973, détectent 16 GRB avec la série des Vela, à des énergies de 0,2 à 1,5 MeV. Ils observent plusieurs sursauts de 0,1 à 30 secondes de durée. Les directions d'arrivée, vaguement indiquées par les trois satellites, excluent la Terre ou le Soleil comme origine des sources. Aucune explosion de nova ou supernova ne coïncide non plus. Les sources apparaissent extragalactiques, et à une distance de 1 Mpc, leur énergie totale serait de 10^{46} ergs. Le mystère est resté entier pendant trente ans. En 1997, la première identification de GRB a permis de lever le voile, grâce au satellite CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory) lancé par les astronomes. L'instrument BATSE (Burst and Transient Sources Experiment) a détecté un GRB par jour. La statistique des directions d'arrivée est isotrope, donc les sources sont d'origine cosmologique, et non galactique. En 1997, l'alerte après un GRB a permis de détecter en optique un *afterglow* ou rémanent, ce qui a donné le *redshift* et la galaxie hôte. Il existe deux catégories de GRB, les longs (> 1 seconde) et les courts (moins d'une seconde). L'identification d'un GRB long avec SN 1998bw ($z = 0,00856$) a montré que les longs peuvent être dus à l'explosion en fin de vie des étoiles. Le satellite Swift, orienté vers la détection des *afterglows*, a permis d'identifier un grand nombre de sources. Il restait encore le mystère de l'énergie énorme de certains GRB, 100 fois supérieure à l'énergie des plus grandes supernovae. La solution était dans le *beaming* : en effet, l'énergie est émise dans un faisceau étroit, et non dans tout l'espace, comme il était supposé. La preuve du *beaming* vient

de la cassure de la courbe de luminosité en fonction du temps, représentant le moment où le jet ralentit, et le facteur de Lorentz Γ devient de l'ordre de 1/ouverture du jet/*beam*. Les *afterglows* des GRB courts montrent qu'il s'agit de la fusion d'objets compacts, d'étoiles à neutrons (NS) ou de NS-BH. Certains GRB sont détectés à très grand *redshift* comme GRB 090423, à $z = 8,23$, ce qui permet de sonder le milieu entre les galaxies, sur la ligne de visée, par absorption.

SÉMINAIRE 8 - GRB : MULTI-LONGUEURS D'ONDE

Susanna Vergani (Observatoire de Paris), le 7 février 2022

COURS 9 - SURSAUTS GAMMA (GRB) : THÉORIES

Le 14 février 2022

Quels sont les mécanismes d'émission des GRB? Quels sont les modèles développés pour expliquer le jet relativiste, et les émissions ultra-énergétiques à toutes les longueurs d'onde? Les observations nous ont déjà posé des contraintes. L'énergie peut être réduite d'un facteur 100 à 1000, en supposant le *beaming* par rapport à une émission isotrope. L'angle du jet est de l'ordre de 10° , étant donné la cassure du jet, lorsque $1/\Gamma \sim$ angle du jet. La matière est éjectée avec une vitesse ultra-relativiste : en effet, dans certains cas, des vitesses superluminiques ont été observées, comme pour GRB 030329, observé en VLBI ($z = 0,1685$). Le facteur de Lorentz Γ est de l'ordre de 100 à 700. La structure du jet se compose de deux parties, une série d'ondes de choc internes pour le sursaut principal, puis, plus loin, une série d'ondes de choc externes, pour l'*afterglow*. Contrairement aux FRB, les GRB sont tous dus à des phénomènes cataclysmiques. Les GRB courts (moins d'une seconde) sont attribués à la fusion d'objets compacts, et les GRB longs (en moyenne une minute, mais avec beaucoup de dispersion), à des effondrements d'étoiles, des hypernovae, ou collapsars. L'objet central final peut toutefois prolonger l'éjection d'énergie par des vents, jets ultra-relativistes, accréition, chocs, spin-down et perte d'énergie cinétique, qui sont observés en *afterglow*. Les seuls sursauts qui se répètent sont les SGR (ou *soft gamma-ray repeaters*), comme une troisième catégorie de GRB. Trois sont connus dans la Voie lactée. Ils correspondent à des magnétars, qui ont des sursauts géants. Ce sont des objets plus faibles, difficiles à détecter à grande distance, bien qu'ils soient plus fréquents.

Les simulations numériques prenant en compte les effets magnétiques parviennent à reproduire le modèle de boule de feu, avec la série de chocs avant/retour, les chocs internes, plus ou moins tardifs, pour rendre compte des sursauts X, et les chocs externes des rémanents. Le GRB court GRB 170817 correspondant à la fusion de deux étoiles à neutrons, et détecté en 2017 par les ondes gravitationnelles, a permis de faire énormément de progrès dans la compréhension de ces phénomènes et des kilonovas associées.

SÉMINAIRE 9 - GRB : HYPERNOVAE, FUSION D'ÉTOILES À NEUTRONS

Frédéric Daigne (Institut d'astrophysique de Paris), le 14 février 2022

RECHERCHE

Nous avons étudié en détail la stabilité du gaz dans les galaxies hôtes de noyaux actifs, capables d'éjecter des quantités considérables de gaz moléculaire. Les trous noirs massifs, possédant des jets radio relativistes non alignés avec le moment angulaire du disque de la galaxie, peuvent entraîner le gaz du disque en dehors de la galaxie et ainsi stopper la formation d'étoiles. Pour étudier la stabilité des nuages capables de former des étoiles dans les écoulements, nous avons modélisé les données CO et HCO⁺ obtenues avec ALMA de la galaxie IC 5063, dans laquelle le jet relativiste impacte les nuages moléculaires. En utilisant un code de transfert radiatif qui effectue de manière cohérente des calculs d'équilibre astrochimique et thermique basés sur les sources de chauffage du gaz, nous avons constaté que le chauffage mécanique et le chauffage par rayons cosmiques (CR) sont tout à fait capables de reproduire individuellement les données. Dans notre modèle le mieux adapté, les CR fournissent environ 1/3 du chauffage du gaz dense au niveau des lobes radio, soulignant le rôle de ce mécanisme souvent négligé dans le chauffage du gaz et la génération potentielle de flots sortants. La température et la densité du gaz indiquent que le passage du jet entraîne une augmentation d'environ 1 ordre de grandeur de la pression interne P_i des nuages moléculaires, quel que soit le mécanisme d'excitation. D'après les flux des raies [S II] et [N II] dans les données VLT MUSE, la pression externe P_e des nuages moléculaires augmente suffisamment dans plusieurs régions pour dépasser P_i . Ce résultat nous amène à conclure que nous observons l'expansion d'un cocon ionisé surpressurisé qui comprime les nuages moléculaires et qui pourrait conduire à la formation d'étoiles. Cependant, certains nuages impactés par le jet, à proximité des voies dégagées par le jet, ont augmenté P_i et diminué P_e . Ils sont susceptibles de subir une évaporation de leurs couches externes. Une partie des couches évaporées pourrait charger en masse le flot moléculaire grâce à la pression dynamique des flux de gaz ionisés co-spatiaux. Les changements de pression observés suggèrent donc que les aspects positif et négatif du *feedback* sur la formation d'étoiles pourraient se produire simultanément.

Les naines bleues compactes (BCD) sont des galaxies à faible luminosité, pauvres en métaux, à concentration centrale, avec de brillants amas de formation d'étoiles. Ces galaxies doivent être très fréquentes au début de l'Univers, mais leur petite taille et leur faible luminosité limitent leur détection à des décalages vers le rouge (z) élevés, ce qui rend leur processus de formation difficile à observer. Des observations de BCD sont nécessaires aux z intermédiaires, où ils sont encore assez jeunes pour montrer leurs stades de formation, en particulier dans leurs régions externes où l'accrétion

de gaz cosmique devrait conduire l'évolution. Nous avons découvert dans des BCD à z intermédiaire un excès d'émission en ultraviolet lointain (FUV) dans les régions externes de 11 BCD dans le champ GOODS-South, en remontant le temps de 1,3 à 2,8 Gyr en cosmologie standard. Ces observations ont été faites par l'Ultra-Violet Imaging Telescope (UVIT) sur AstroSat. Pour 10 BCD, les profils radiaux d'émission FUV intrinsèque, corrigés pour la fonction d'étalement de l'instrument, ont des longueurs d'échelle plus grandes que leurs homologues optiques observés avec le télescope spatial Hubble. De tels profils FUV peu profonds suggèrent une formation d'étoiles étendue dans des disques d'accrétion cosmique. La structure fragmentée du FUV suggère également que les disques FUV externes sont gravitationnellement instables. La friction dynamique sur les fragments les pousse vers l'intérieur à une vitesse moyenne supérieure à $10^6 M_{\odot}$ par milliard d'années.

Dans les amas de galaxies, les effets de marée, de pression dynamique, de collisions, perturbent le contenu gazeux des galaxies, l'éjectent dans le milieu inter-amas, et stoppent la formation d'étoiles. Nous avons découvert dans l'amas de galaxies Abell 1367 un nuage de gaz isolé grâce à l'émission de la molécule CO et du gaz HI. Le nuage est situé à environ 800 kpc en projection du centre de l'amas et à une distance projetée de > 80 kpc de n'importe quelle galaxie. C'est le premier et le seul nuage « intra-amas » isolé connu qui ait été détecté dans les émissions de rayons X, de H α et de CO. Nous avons trouvé un total d'environ $2,2 \times 10^8 M_{\odot}$ de H $_2$ avec le télescope IRAM-30 m dans deux régions, l'une associée au pic d'émission H α et l'autre au pic d'émission de rayons X entouré de filaments H α faibles. La vitesse du gaz moléculaire est décalée de l'émission H α sous-jacente de 100 km/s dans la région où les rayons X culminent. Le gaz moléculaire peut représenter environ 10 % de la masse totale du nuage, qui est dominée par la composante chaude émettrice de rayons X. La limite supérieure mesurée du taux de formation d'étoiles dans le nuage indique que le composant moléculaire est dans un état de non-formation d'étoiles, probablement en raison d'une combinaison de faible densité du gaz et de forte dispersion de vitesse. La présence des trois phases gazeuses associées au nuage suggère qu'un mélange de phase avec le milieu intra-amas environnant a eu lieu. L'origine possible du nuage orphelin est un stade évolutif tardif de balayage par pression dynamique.

Les galaxies centrales d'amas sont le site de flots de gaz qui se refroidit à partir de l'atmosphère ultra-chaude (des dizaines de millions de degrés) de l'amas qui émet en rayons X. Cette atmosphère contient plus de masse que toutes les galaxies réunies. Nous avons étudié le quasar IRAS 09104+4109, à $z = 0,4418$, situé au centre d'un amas. Grâce aux cartes CO faites par NOEMA (Northern Extended Millimeter Array), nous avons identifié $\sim 4,5 \times 10^{10} M_{\odot}$ de gaz moléculaire dans et autour de la galaxie. Le gaz moléculaire est situé dans une série de nuages s'étendant le long des anciens jets radio et lobes. Il présente une dispersion de vitesse relativement faible et ne montre aucun gradient de vitesse indiquant un écoulement ou un flot. Environ la moitié du gaz est située du côté nord-est de la galaxie, chevauchant un filament de gaz ionisé brillant et un excès d'émission de rayons X, ce qui suggère qu'il s'agit d'un

emplacement de refroidissement rapide. Le gaz moléculaire est exceptionnellement étendu, jusqu'à un rayon d'environ 55 kpc, comparable à l'échelle de la nébuleuse filamenteuse de l'amas de Persée, malgré le décalage vers le rouge beaucoup plus élevé de ce système. L'étendue se situe dans le rayon d'instabilité thermique du milieu intra-amas (ICM), avec un rapport temps de refroidissement/temps de chute libre de $t_{\text{cool}}/t_{\text{ff}} < 25$ à moins de 70 kpc. Les mesures du continuum à 2 mm de longueur d'onde de NOEMA et à 850 μm du télescope James Clerk Maxwell (JCMT-SCUBA-2) montrent un excès d'émission dans l'infrarouge lointain, que nous interprétons comme une émission *free-free* résultant d'une flambée de formation d'étoiles. Ces observations suggèrent que le refroidissement du gaz intra-amas n'est pas fortement affecté par le quasar enfoui et qu'il peut alimenter son activité.

Nous avons détecté avec l'interféromètre NOEMA une grande quantité de gaz moléculaire dans la galaxie hôte du quasar J0015+1842 à $z = 2,63$, remontant le temps à 2,5 milliards d'années seulement après le Big-Bang. Le gaz moléculaire révèle une dispersion de vitesse remarquablement élevée de 1000 km/s, et correspond à une masse totale $\text{MH}_2 \approx 3,4 \times 10^{10} M_{\odot}$, selon le facteur de conversion CO- H_2 standard. En supposant que l'émission continue de 3 mm est thermique, nous décrivons une masse de poussière d'environ 500 millions de masses solaires, plaçant le quasar dans la région moléculaire riche en gaz du diagramme de luminosité de la raie IR versus CO. Alors que la forte dispersion de vitesse de la raie CO suggère un système de galaxies en fusion, J0015+1842 apparaît comme un quasar de type I régulier, seulement très modérément obscurci à partir de son spectre UV-optique. Nous suggérons que le quasar est observé à un stade évolutif de la galaxie où une fusion massive a amené des quantités importantes de gaz vers le trou noir supermassif, provoquant son activité de quasar. Alors que l'hôte contient encore une grande quantité de poussière et de gaz moléculaire avec une dispersion à grande vitesse, le quasar a déjà ouvert une voie vide de gaz vers l'observateur, probablement par de puissantes éjections, comme l'ont récemment révélé des observations optiques de flot ionisé. Les observations à haute résolution angulaire de ce système et de systèmes similaires devraient nous aider à mieux déterminer l'importance respective de l'évolution et de l'orientation dans l'apparition des quasars et de leurs galaxies hôtes. Ces observations ont le potentiel d'étudier les processus de rétroaction précoce et de formation d'étoiles des galaxies dans leurs phases de quasar.

Il est maintenant bien établi que les galaxies ont des morphologies, des contenus en gaz et des taux de formation d'étoiles (SFR) différents dans des environnements denses comme les amas de galaxies. L'impact de la densité environnementale s'étend à plusieurs rayons du viriel, et les galaxies semblent être perturbées et modifiées dans les filaments et les groupes avant de tomber dans l'amas. Notre objectif est de quantifier ce pré-processing en termes de teneur en gaz et de SFR, en fonction de la densité dans les filaments cosmiques. Nous avons observé les deux premières transitions de CO dans 163 galaxies avec le télescope IRAM-30 m, et ajouté 82 mesures supplémentaires à celles de la littérature, formant ainsi un échantillon de 245 galaxies dans

les filaments autour de l'amas de la Vierge. Nous avons rassemblé les mesures HI-21 cm de la littérature et observé 69 galaxies avec le télescope de Nançay pour compléter notre échantillon. Nous confrontons nos galaxies dans les filaments avec des échantillons comparables de l'amas de la Vierge et avec les galaxies isolées de l'échantillon AMIGA. Nous trouvons une nette progression des galaxies de champ isolées vers les galaxies dans les filaments et les amas pour la diminution du SFR, l'augmentation de la fraction de galaxies dans la phase d'extinction, une proportion croissante de galaxies de type précoce et la diminution de la teneur en gaz. Les galaxies en phase d'extinction, définies comme ayant un SFR inférieur au tiers de celui de la séquence principale (MS), ne sont qu'entre 0 % et 20 % dans l'échantillon isolé, selon la densité locale des galaxies, alors qu'elles sont de 20 % à 60 % dans les filaments et de 30 % à 80 % dans l'amas de la Vierge. Les processus qui conduisent à l'extinction de la formation d'étoiles sont déjà opérationnels dans les filaments; ils dépendent principalement de la densité locale des galaxies, tandis que la distance à la colonne vertébrale du filament est un paramètre secondaire. Alors que le rapport de masse entre gaz atomique et étoiles diminue avec la densité locale d'un ordre de grandeur dans les filaments et de deux ordres de grandeur dans l'amas de la Vierge par rapport au champ, la diminution est bien moindre pour le rapport de masse entre gaz moléculaire et étoiles. À mesure que la densité environnementale augmente, le temps d'appauvrissement en gaz diminue, car la teneur en gaz diminue plus rapidement que le SFR. Cela suggère que l'appauvrissement en gaz précède l'extinction de la formation d'étoiles.

PUBLICATIONS

Messa M., Dessauges-Zavadsky M., Richard J., Adamo A., Nagy D., Combes F., Mayer L. et Ebeling H., « Multiply lensed star forming clumps in the A521-sys1 galaxy at redshift 1 », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 516, n° 2, 2022, p. 2420-2443, <https://doi.org/10.1093/mnras/stac2189> [arXiv : 2208.02863].

Castignani G., Radovich M., Combes F., Salomé P., Maturi M., Moscardini L., Bardelli S., Giocoli C., Lesci G., Marulli F., Puddu E. et Sereno M., « Star forming and gas-rich brightest cluster galaxies at $z = 0.4$ in the Kilo-Degree Survey », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 667, 2022, art. A52, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243689> [arXiv : 2207.12073].

Borgohain A., Saha K., Elmegreen B., Gogoi R., Combes F. et Tandon S.N., « Extended far-ultraviolet emission in distant dwarf galaxies », *Nature*, vol. 607, 2022, p. 459-462, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04905-9>.

Srianand R., Gupta N., Petitjean P., Momjian E., Balashev S.A., Combes F., Chen H.-W., Krogager J.-K., Noterdaeme P., Rahmani H., Baker A.J., Emig K.L., Jozsa G.I.G., Kloeckner H.-R. et Moodley K., « Emergence of a new HI 21-cm absorption component at $z \sim 1.1726$ towards the gamma-ray blazar PKS-2355-106 », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 516, n° 1, 2022, p. 1339-1346, <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1877> [arXiv : 2207.01807].

Maina E.K., Mohapatra A., Józsa G.I.G., Gupta N., Combes F., Deka P., Wagnveld J.D., Srianand R., Balashev S.A., Chen H.-W., Krogager J.-K., Momjian E., Noterdaeme P. et Petitjean P., « Mapping HI 21-cm in the Klemola 31 group at $z = 0.029$: Emission and absorption towards PKS2020-370 », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 516, n° 2, 2022, p. 2050-2061, <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1752> [arXiv : 2206.09940].

Tristram K.R.W., Impellizzeri C.M.V., Zhang Z.-Y., Villard E., Henkel C., Viti S., Burtscher L., Combes F., Garcia-Burillo S., Martin S., Meisenheimer K. et van der Werf P.P., « ALMA imaging of the cold molecular and dusty disk in the type 2 active nucleus of the Circinus galaxy », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 664, 2022, art. A142, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243535> [arXiv : 2206.00782].

Rajwade K.M., Bezuidenhout M.C., Caleb M., Driessen L.N., Jankowski F., Malenta M., Morello V., Sanidas S., Stappers B.W., Surnis M.P., Barr E.D., Chen W., Kramer M., Wu J., Buchner S., Serylak M., Combes F. *et al.*, « First discoveries and localizations of Fast Radio Bursts with MeerTRAP: Real-time, commensal MeerKAT survey », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 514, n° 2, 2022, p. 1961-1974, <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1450> [arXiv : 2205.14600].

Winkel N., Husemann B., Davis T.A., Smirnova-Pinchukova I., Bennert V.N., Combes F., Gaspari M., Jahnke K., Neumann J., O'Dea C.P., Perez-Torres M., Singha M., Tremblay G.R. et Rix H.W., « The Close AGN Reference Survey (CARS): Tracing the circumnuclear star formation in the super-Eddington NLS1 Mrk 1044 », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 663, 2022, art. A104, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243697> [arXiv : 2205.06271].

Combes F., « Molecular gas dynamics around nuclei of galaxies », conférence prononcée à l'occasion du colloque « Multi-line diagnostics of the interstellar medium » (Nice, 4-6 avril 2022), à paraître dans *The European Physical Journal Web of Conferences*, <https://arxiv.org/abs/2205.06106>.

Dasyra K.M., Paraschos G.F., Bisbas T., Combes F. et Fernandez-Ontiveros J.A., « Linking pressure gradients with the stability of molecular clouds in galactic outflows », 2022, <https://arxiv.org/abs/2205.05642>.

Kim D.-J., Krichbaum T.P., Henkel C., Impellizzeri V., Combes F., Bach U., Mauersberger R. et Zensus A., « The onset of jet-ISM interaction in the Seyfert galaxy NGC3079: VLBI study of OH absorption at sub-pc scale », *Proceedings of Science*, vol. 399, 2022, <https://doi.org/10.22323/1.399.0038> [HAL : obspm-03991935].

Sun F., Egami E., Fujimoto S., Rawle T., Bauer F.E., Kohno K., Smail I., Perez-Gonzalez P.G., Ao Y., Chapman S.C., Combes F. *et al.*, « ALMA Lensing Cluster Survey: ALMA-Herschel joint study of lensed dusty star-forming galaxies across $z = 0.5-6$ », *The Astrophysical Journal*, vol. 932, n° 2, 2022, art. 77, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac6e3f> [HAL : insu-03717105].

Castignani G., Meyer E., Chiaberge M., Combes F., Morishita T., Decarli R., Capetti A., Dotti M., Tremblay G. et Norman C.A., « NOEMA observations support a recoiling black hole in 3C 186 », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 661, 2022, art. L2, <https://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202243309> [HAL : hal-03657941].

Audibert A., Dasyra K.M., Papachristou M., Fernandez-Ontiveros J.A., Ruffa I., Bisigello L., Combes F., Salome P. et Gruppioni C., « CO in the ALMA Radio-Source Catalogue (ARC): The molecular gas content of radio galaxies as a function of redshift », *Astronomy and Astrophysics*, 2022, à paraître, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.15486>.

Gupta N., Srianand R., Momjian E., Shukla G., Combes F., Krogager J.-K., Noterdaeme P. et Petitjean P., « HI gas playing hide-and-seek around a powerful FRI-type quasar at $z \sim 2.1$ », *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 927, n° 2, 2022, art. L24, <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac589f>.

- Hogan L., Rigopoulou D., Garcia-Burillo S., Alonso-Herrero A., Barrufet L., Combes F., Garcia-Bernete I., Magdis G.E., Pereira-Santaella M., Thatte N. et Weiss A., « Unveiling the main sequence to starburst transition region with a sample of intermediate redshift luminous infrared galaxies », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 512, n° 2, 2022, p. 2371-2388, <https://doi.org/10.1093/mnras/stac520>.
- Boettcher E., Gupta N., Chen H.-W., Chen M.C., Jozsa G.I.G., Rudie G.C., Cantalupo S., Johnson S.D., Balashev S.A., Combes F., Cooksey K.L., Faucher-Giguere C.-A., Krogager J.-K., Lopez S., Momjian E., Noterdaeme P., Petitjean P., Rafelski M., Srianand R., Walth G.L. et Zahedy F.S., « Discovery of a damped Ly-alpha absorber originating in a spectacular interacting dwarf galaxy pair at $z = 0.026$ », *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 926, n° 2, 2022, art. L33, <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac5250>.
- Jachym P., Sun M., Yagi M., Ge C., Luo R., Combes F., Kabatova A., Kenney J.D.P., Scott T.C. et Brinks E., « Non-star-forming molecular gas in the Abell 1367 intra-cluster multiphase orphan cloud », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 658, 2022, art. L5, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142791>.
- Olivares V., Salome P., Hamer S.L., Combes F., Gaspari M., Kolokythas K., O'Sullivan E., Beckmann R.S., Babul A., Polles F.L., Lehnert M., Loubser S.I., Donahue M., Gendron-Marsolaïs M.-L., Lagos P., Pineau des Forets G., Godard B., Rose T., Tremblay G., Ferland G. et Guillard P., « Gas condensation in Brightest Group Galaxies unveiled with MUSE », *Astronomy and Astrophysics*, 2022, à paraître, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.07838>.
- Maschmann D., Melchior A.-L., Combes F., Mazzilli Ciraulo B., Freundlich J., Halle A. et Drabent A., « Central star formation in double-peak gas rich radio galaxies », *Astronomy and Astrophysics*, 2022, à paraître, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.12796>.
- Yadav J., Das M., Barway S. et Combes F., « Hidden in plain sight: UVIT and MUSE discovery of a large, diffuse star-forming galaxy », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 657, 2022, art. L10, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142477>.
- Mahato M., Dabhade P., Saikia D.J., Combes F., Bagchi J., Ho L.C. et Raychaudhury S., « Search and analysis of giant radio galaxies with associated nuclei (SAGAN). III: New insights into giant radio quasars », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 660, 2022, art. A59, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141928>.
- Smirnova-Pinchukova I., Husemann B., Davis T.A., Smith C.M.A., Singha M., Tremblay G.R., Klessen R.S., Powell M., Connor T., Baum S.A., Combes F., Croom S.M., Gaspari M., Neumann J., O'Dea C.P., Perez-Torres M., Rosario D.J., Rose T., Scharwachter J. et Winkel N., « The Close AGN Reference Survey (CARS): No obvious signature of AGN feedback on star formation, but subtle trends », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 659, 2022, art. A125, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142011>.
- Singha M., Husemann B., Urrutia T., O'Dea C.P., Scharwachter J., Gaspari M., Combes F., Nevin R., Terrazas B.A., Perez-Torres M., Rose T., Davis T.A., Tremblay G.R., Neumann J., Smirnova-Pinchukova I. et Baum S.A., « The Close AGN Reference Survey (CARS): Locating the [O III] wing component in luminous local Type 1 AGN », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 659, 2022, art. A123, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040122>.
- Husemann B., Singha M., Scharwachter J., McElroy R., Neumann J., Smirnova-Pinchukova I., Urrutia T., Baum S.A., Bennert V.N., Combes F., Croom S.M., Davis T.A., Fournier Y., Galkin A., Gaspari M., Henke H., Krumpe M., O'Dea C.P., Perez-Torres M., Rose T., Tremblay G.R. et Walcher C.J., « The Close AGN Reference Survey (CARS): IFU survey data and the BH mass dependence of long-term AGN variability », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 659, 2022, art. A124, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141312>.
- Wootten A., Bentley R.O., Baldwin J., Combes F., Fabian A.C., Ferland G.J., Loh E., Salome P., Shingledecker C.N. et Castro-Carrizo A., « Dense molecular clouds in the Crab

supernova remnant », *The Astrophysical Journal*, vol. 925, n° 1, 2022, art. 59, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac391a>.

Laudari S., Jachym P., Sun M., Waldron W., Chatzikos M., Kenney J., Luo R., Nulsen P., Sarazin C., Combes F., Edge T., Voit G.M., Donahue M. et Cortese L., « ESO 137-002: A large spiral undergoing edge-on ram-pressure stripping with little star formation in the tail », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 509, n° 3, 2022, p. 3938-3956, <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3280>.

Castignani G., Vulcani B., Finn R.A., Combes F., Jablonka P., Rudnick G., Zaritsky D., Whalen K., Conger G., de Lucia G., Desai V., Koopmann R.A., Moustakas J., Norman D.J. et Townsend M., « Virgo filaments II: Catalog and first results on the effect of filaments on galaxy properties », *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 259, n° 2, 2022, art. 43, <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac45f7>.

Nagy D., Dessauges-Zavadsky M., Richard J., Schaerer D., Combes F., Messa M. et Chisholm J., « Radial profiles of lensed $z = 1$ galaxies on sub-kiloparsec scales », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 657, 2022, art. A25, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141557>.

Gupta N., Shukla G., Srianand R., Krogager J.-K., Noterdaeme P., Baker A.J., Combes F., Fynbo J.P.U., Momjian E., Hilton M., Hussain T., Moodley K., Petitjean P., Chen H.W., Deka P., Dutta R., Jose J., Jozsa G.I.G., Kaski C., Klockner H.-R., Knowles K., Sikhosana S. et Wagenveld J., « MALS SALT-NOT survey of MIR-selected powerful radio-bright AGN at $0 < z < 3.5$ », *The Astrophysical Journal*, vol. 929, n° 1, 2022, art. 108, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac4220>.

Papachristou M., Dasyra K.M., Fernandez-Ontiveros J.A., Audibert A., Ruffa I. et Combes F., « CO kinematics unveil outflows plausibly driven by a young jet in the gigahertz peaked radio core of NGC 6328 », *Astronomische Nachrichten*, vol. 342, n° 9-10, 2021, p. 1160-1165, <https://doi.org/10.1002/asna.20210063> [arXiv : 2111.00453].

O'Sullivan E., Kunert-Bajraszewska M., Siemiginowska A., Burke D.J., Combes F., Salome P. et Giacintucci S., « 1321+045: A compact steep spectrum radio source in a cool-core galaxy cluster », *Astronomische Nachrichten*, vol. 342, n° 9-10, 2021, p. 1155-1159, <https://doi.org/10.1002/asna.20210035> [arXiv : 2110.08358].

O'Sullivan E., Combes F., Babul A., Chapman S., Phadke K.A., Schellenberger G. et Salome P., « Molecular gas along the old radio jets of the cluster-central type 2 quasar IRAS 09104+4109 », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 508, n° 3, 2021, p. 3796-3811, <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2825>.

Mazzilli Ciraulo B., Melchior A.-L., Maschmann D., Katkov I.Y., Halle A., Combes F., Gelfand J.D. et Al Yazeedi A., « Two interacting galaxies hiding as one, revealed by MaNGA », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 653, 2021, art. A47, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141319>.

Sun F., Egami E., Perez-Gonzalez P.G., Smail I., Caputi K.I., Bauer F.E., Rawle T.D., Fujimoto S., Kohno K., Dudzeviciute U., Atek H., Bianconi M., Chapman S.C., Combes F., Jauzac M., Jolly J.-B., Koekemoer A.M., Magdis G.E., Rodighiero G., Rujopakarn W., Schaerer D., Steinhart C.L., van der Werf P., Walth G.L. et Weaver J.R., « Extensive lensing survey of optical and near-infrared dark objects (El Sonido): HST H-Faint galaxies behind 101 lensing clusters », *The Astrophysical Journal*, vol. 922, n° 2, 2021, art. 114, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac2578>.

Combes F., « Science with SKA, SF2A-2021 Proceedings », 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.03915>.

Alonso-Herrero A., Garcia-Burillo S., Hoenig S.F., Garcia-Bernete I., Ramos Almeida C., Gonzalez-Martin O., Lopez-Rodriguez E., Boorman P.G., Bunker A.J., Burtcher L., Combes F., Davies R., Diaz-Santos T., Gandhi P., Garcia-Lorenzo B., Hicks E.K.S., Hunt L.K., Ichikawa K., Imanishi M., Izumi T., Labiano A., Levenson N.A., Packham C.,

- Pereira-Santaella M., Ricci C., Rigopoulou D., Roche P., Rosario D.J., Rouan D., Shimizu T., Stakevski M., Wada K. et Williamson D., « The Galaxy Activity, Torus, and Outflow Survey (GATOS): II. Torus and polar dust emission in nearby Seyfert galaxies », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 652, 2021, art. A99, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141219>.
- Diaz-Garcia S., Lisenfeld U., Perez I., Zurita A., Verley V., Combes F., Espada D., Leon S., Martinez-Badenes V., Sabater J. et Verdes-Montenegro L., « Molecular gas and star formation within 12 strong galactic bars observed with IRAM-30 m », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 654, 2021, art. A135, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140674>.
- Yadav J., Das M., Barway S. et Combes F., « A triple active galactic nucleus in the NGC 7733-7734 merging group », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 651, 2021, art. L9, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141210>.
- Bewketu Belete A., Andreani P., Fernandez-Ontiveros J.A., Hatziminaoglou E., Combes F., Sirressi M., Slater R., Ricci C., Dasyra K., Ciccone C., Aalto S., Spinoglio L., Imanishi M. et De Medeiros J.R., « Molecular gas kinematics in the nuclear region of nearby Seyfert galaxies with ALMA », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 654, 2021, art. A24, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140492>.
- Ghosh S., Saha K., Jog C.J., Combes F. et Di Matteo P., « Genesis of morpho-kinematic lopsidedness in minor merger of galaxies », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 511, n° 4, 2022, p. 5878-5896, <https://doi.org/10.1093/mnras/stac461>.
- Sperone-Longin D., Jablonka P., Combes F., Castignani G., Krips M., Rudnick G., Desjardins T., Zaritsky D., Finn R.A., De Lucia G. et Desai V.I., « SEEDisCS. II. Molecular gas in galaxy clusters and their large-scale structure: The case of CL1301.7-1139 », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 654, 2021, art. A69, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140941>.
- Polles F.L., Salome P., Guillard P., Godard B., Pineau des Forets G., Olivares V., Beckmann R.S., Canning R.E.A., Combes F., Dubois Y., Edge A.C., Fabian A.C., Ferland G.J., Hamer S.L. et Lehnert M.D., « Excitation mechanisms in the intracluster filaments surrounding Brightest Cluster Galaxies », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 651, 2021, art. A13, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039730>.
- Garcia-Burillo S., Alonso-Herrero A., Ramos Almeida C., Gonzalez-Martin O., Combes F., Usero A., Hoenig S., Querejeta M., Hicks E.K.S., Hunt L.K., Rosario D., Davies R., Boorman P.G., Bunker A.J., Burstcher L., Colina L., Diaz-Santos T., Gandhi P., Garcia-Bernete I., Garcia-Lorenzo B., Ichikawa K., Imanishi M., Izumi T., Labiano A., Levenson N., Lopez-Rodriguez E., Packham C., Pereira-Santaella M., Ricci C., Rigopoulou D., Rouan D., Stalevsk M., Wada K. et Williamson D., « The Galaxy Activity, Torus and Outflows Survey (GATOS). I. ALMA images of dusty molecular tori in Seyfert galaxies », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 652, 2021, art. A98, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141075>.
- Pereira-Santaella M., Colina L., Garcia-Burillo S., Lamperti I., Gonzalez-Alfonso E., Perna M., Arribas S., Alonso-Herrero A., Aalto S., Combes F., Labiano A., Piqueras-Lopez J., Rigopoulou D. et van der Werf P., « Physics of ULIRGs with MUSE and ALMA: The PUMA project. II. Are local ULIRGs powered by AGN? The subkiloparsec view of the 220 GHz continuum », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 651, 2021, art. A42, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140955>.
- O'Sullivan E., Kunert-Bajraszewska M., Siemiginowska A., Burke D.J., Combes F., Salomé P. et Giacintucci S., « The cluster-central compact steep-spectrum radio galaxy 1321+045 », *The Astrophysical Journal*, vol. 913, n° 2, 2021, art. 105, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abf6c6>.
- Noterdaeme P., Balashev S., Combes F., Gupta N., Srianand R., Krogager J.-K., Laursen P. et Omont A., « Remarkably high mass and high velocity dispersion of molecular gas associated with a regular, absorption-selected type-I quasar », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 651, 2021, art. A17, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140745>.

- Gupta N., Srianand R., Shukla G., Krogager J.-K., Noterdaeme P., Combes F., Dutta R., Fynbo J.P.U., Hilton M., Momjian E., Moodley K. et Petitjean P., « Evolution of cold gas at $2 < z < 5$: A blind search for HI and OH absorption lines towards mid-infrared color selected radio-loud AGNs », *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 255, n° 2, 2021, art. 28, <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac03b5>.
- Falstad N., Aalto S., Koenig S., Onishi K., Muller S., Gorski M., Sato M., Stanley F., Combes F., Gonzalez-Alfonso E., Mangum J.G., Evans A.S., Barcos-Munoz L., Privon G.C., Linden S.T., Diaz-Santos T., Martin S., Sakamoto K., Harada N., Fuller G.A., Gallagher J.S., van der Werf P.P., Viti S., Greve T.R., Garcia-Burillo S., Henkel C., Imanishi M., Izumi T., Nishimura Y., Ricci C. et Muehle S., « CON-quest: Searching for the most obscured galaxy nuclei », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 649, 2021, art. A105, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039291>.
- Belli S., Contursi A., Genzel R., Tacconi L.J., Foerster-Schreiber N.M., Lutz D., Combes F., Neri N., Garcia-Burillo S., Schuster K.F., Herrera-Camus R., Tadaki K., Davies R.L., Davies R.I., Johnson B.D., Lee M.M., Leja J., Nelson E.J., Price S.H., Shangquan J., Shimizu T.T., Tacchella S. et Ubler H., « The diverse molecular gas content of massive galaxies undergoing quenching at $z = 1$ », *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 909, n° 1, 2021, art. L11, <https://doi.org/10.3847/2041-8213/abe6a6>.
- Vantyghem A.N., McNamara B.R., O'Dea C.P., Baum S.A., Combes F., Edge A.C., Fabian A.C., McDonald M., Nulsen P.E.J., Russell H.R. et Salome P., « A massive, clumpy molecular gas distribution and displaced AGN in Zw 3146 », *The Astrophysical Journal*, vol. 910, n° 1, 2021, art. 53, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abe306>.
- Castignani G., Combes F., Jablonka P., Finn R.A., Rudnick G., Vulcani B., Desai V., Zaritsky D. et Salomé P., « Processing of gas in cosmological filaments around Virgo cluster », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 657, 2022, art. A9, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040141>.
- Sun F., Egami E., Rawle T.D., Walth G.L., Smail I., Dessauges-Zavadsky M., Perez-Gonzalez P.G., Richard J., Combes F., Ebeling H., Pello R., van der Werf P.P., Altieri B., Boone F., Cava A., Chapman S.C., Clement B., Finoguenov A., Nakajima K., Rujopakarn W., Schaerer D. et Valtchanov I., « ALMA 1.3 mm survey of lensed submillimeter galaxies (SMGs) selected by Herschel: Discovery of spatially extended SMGs and implications », *The Astrophysical Journal*, vol. 908, n° 2, 2021, art. 192, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abd6e4>.
- Combes F., Gupta N., Muller S., Balashev S., Jozsa G.I.G., Srianand R., Momjian E., Noterdaeme P., Kloeckner H.R., Baker A.J., Boettcher E., Bosma A., Chen H.W., Dutta R., Jagannathan P., Jose J., Knowles K., Krogager J.K., Kulkarni V.P., Moodley K., Pandey S., Petitjean P. et Sekhar S., « PKS 1830-211: OH and HI at $z = 0.89$ and the first MeerKAT UHF spectrum », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 648, 2021, art. A116, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040167>.
- Sperone-Longin D., Jablonka P., Combes F., Castignani G., Krips M., Rudnick G., Zaritsky D., Finn R.A., De Lucia G. et Desai V., « SEEDisCS. I. Molecular gas in galaxy clusters and their large-scale structure: The case of CL1411.1-1148 at $z = 0.5$ », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 647, 2021, art. A156, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038904>.
- Audibert A., Combes F., Garcia-Burillo S., Hunt L., Eckart A., Aalto S., Casasola V., Boone F., Krips M., Viti S., Muller S., Dasyra K., van der Werf P. et Martin S., « Black hole feeding and star formation in NGC 1808 », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 656, 2021, art. 60, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039886>.
- Mirakhor M.S., Walker S.A., Bagchi J., Fabian A.C., Barth A.J., Combes F., Dabhade P., Ho L.C. et Pandge M.B., « Exploring the hot gaseous halo around an extremely massive and relativistic jet launching spiral galaxy with *XMM-Newton* », *Monthly Notices of the Royal*

Astronomical Society, vol. 500, n° 2, 2021, p. 2503-2513, <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3404>.

Ciambur B.C., Fragkoudi F., Khoperskov S., Di Matteo P. et Combes F., « Double X/Peanut Structures in Barred Galaxies—Insights from an N -body Simulation », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 503, n° 2, 2021, p. 2203-2214, <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3814>.

Ghosh S., Saha K., Di Matteo P. et Combes F., « Fate of stellar bars in minor merger of galaxies », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 502, n° 2, 2021, p. 3085-3100, <https://doi.org/10.1093/mnras/stab238>.

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 », *The Astrophysical Journal*, vol. 907, n° 1, 2021, art. 11, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abcb85>.