



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences



Trous noirs supermassifs et noyaux actifs de galaxies

Mardi 29 mars 2022 de 14h30 à 16h45

Grande salle des séances
de l'Institut de France

23, quai de Conti, 75006 Paris

Il est désormais admis que chaque grosse galaxie abrite un trou noir super-massif (TNSM), c'est-à-dire une masse entre un million et quelques milliard de fois la masse du soleil. C'est en particulier le cas de notre propre galaxie, la Voie lactée où la détection du mouvement orbital des étoiles les plus proches du centre galactique, la source radio Sagittarius A*, a permis aux deux équipes rassemblées autour de Reinhard Genzel et d'Andrea Ghez de définitivement valider ce qui demeurait une hypothèse : la présence d'un TNSM de 4 millions de masse solaire. Tous deux ont reçu conjointement le prix Nobel de physique pour cette découverte. L'exposé du Pr. Reinhard Genzel portera sur l'historique de cette réussite majeure, ainsi que sur les résultats récents liés à la physique de la gravité extrême autour de ce trou noir. Dans les galaxies plus lointaines, la difficulté d'analyse de l'environnement complexe des TNSM réside dans leur grande distance qui réclame des images d'une très grande finesse angulaire. Depuis une dizaine d'années, les progrès instrumentaux ont été remarquables dans plusieurs domaines de longueur d'onde du visible au millimétrique en particulier grâce à la technique de l'interférométrie. De belles avancées sur l'environnement des TNSM au cœur des galaxies ont ainsi été permises récemment grâce à ces progrès observationnels qui concernent les instruments ALMA, GRAVITY et MUSE. Elles sont présentées par trois acteurs majeurs de ces découvertes : Françoise Combes, Guy Perrin et Nicolas Bouché. Catherine Cesarsky apportera en guise de conclusion un éclairage large sur les télescopes européens au Chili.



Les organisateurs de la séance scientifique



Catherine CESARSKY

Haut conseiller scientifique au Commissariat à l'énergie atomique, membre de l'Académie des sciences

Après avoir animé l'école française des travaux théoriques en astrophysique des hautes énergies, Catherine Cesarsky a joué un rôle clé dans l'évolution de l'astronomie spatiale européenne et française vers l'astronomie infrarouge, puis a lancé les grands projets actuels d'astronomie au sol. Directrice générale de l'Observatoire Européen Austral (ESO) de 1999 à 2007, Haut-Commissaire au CEA jusqu'en 2012, elle a présidé le Haut Conseil des Très Grandes Infrastructures de Recherche de 2013 à 2018. Déléguée aux relations internationales de l'Académie des sciences jusqu'en 2017, elle est depuis janvier 2018 présidente du conseil d'administration du projet SKA (*Square Kilometre Array*).



Françoise COMBES

Astrophysicienne à l'Observatoire de Paris, professeure au Collège de France, membre de l'Académie des sciences

Françoise Combes est professeure au Collège de France, sur la chaire «Galaxies et cosmologie». Membre de l'Académie des sciences, elle travaille à l'Observatoire de Paris sur la formation et l'évolution des galaxies, leur dynamique et leur croissance en symbiose avec les trous noirs super-massifs, ainsi que sur des modèles de matière noire. Elle a contribué à mettre en évidence le rôle des noyaux actifs dans la modulation et la suppression de la formation d'étoiles, et notamment dans les amas de galaxies. Elle a reçu plusieurs prix, dont la médaille d'or du CNRS en 2020.



Pierre LÉNA

Professeur émérite à l'Université de Paris Cité et à l'Observatoire de Paris, membre de l'Académie des sciences

Astrophysicien, co-fondateur de *La main à la pâte*, membre de l'Académie des sciences Pierre Léna est un astrophysicien qui a accompagné l'émergence, depuis 1960, de l'astronomie infrarouge, explorant un ciel et des objets jusqu'ici inconnus, grâce à des techniques nouvelles pour détecter et analyser cette lumière invisible à l'œil, messagère d'informations essentielles sur les objets froids de l'univers. Pierre Léna est également engagé au service de la diffusion et de l'enseignement des sciences, tant pour la formation des chercheurs et vers le grand public, qu'à l'école. Il rejoint les physiciens Georges Charpak et Yves Quéré pour créer *La main à la pâte* en 1996. Il présida de 2011 à 2014 la nouvelle Fondation *La main à la pâte*, dont il est président d'honneur.



Daniel ROUAN

Directeur de recherche émérite au CNRS, Observatoire de Paris, membre de l'Académie des sciences

Daniel Rouan a centré sa recherche instrumentale sur le développement de l'astronomie infrarouge en France, au sol et dans l'espace et plus particulièrement sur l'imagerie à haute résolution angulaire et à haut contraste (optique adaptative et coronagraphie). Il est co-découvreur d'une trentaine de planètes extrasolaires. Il étudie également l'environnement des noyaux actifs de galaxies. En particulier au centre de la Voie Lactée, il a participé à l'équipe internationale qui a prouvé la présence d'un trou noir ultra-massif de 4 millions de masses solaires. Il a dirigé l'école doctorale d'Astronomie Astrophysique d'Ile-de-France et est président de la fondation *La Main à la Pâte* depuis mars 2021.

Programme

- 14:30** **Ouverture de la séance**
Patrick FLANDRIN, Président de l'Académie des sciences
Étienne GHYS, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences
Daniel ROUAN, directeur de recherche émérite au CNRS, Observatoire de Paris, membre de l'Académie des sciences
- 14:35** ***A 40-Year Journey***
Reinhard GENZEL, directeur au *Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics*, lauréat du prix Nobel de physique 2020, associé étranger de l'Académie des sciences
- 15:15** **Tout près des trous noirs avec ALMA**
Françoise COMBES, astrophysicienne à l'Observatoire de Paris, professeure au Collège de France, membre de l'Académie des sciences
- 15:40** **MUSE et le rôle des trous noirs sur l'évolution des galaxies**
Nicolas BOUCHÉ, astrophysicien, chargé de recherche au CNRS, Centre de recherche en astrophysique de Lyon (CRAL)
- 16:05** **Voyage au cœur des galaxies actives**
Guy PERRIN, astronome à l'Observatoire de Paris, laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (LESIA)
- 16:35** **Conclusion**
Catherine CESARSKY, haut conseiller scientifique au Commissariat à l'énergie atomique, membre de l'Académie des sciences

Résumés et biographies



Reinhard GENZEL

Directeur au Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, lauréat du prix Nobel de physique 2020, associé étranger de l'Académie des sciences

Reinhard Genzel, born 1952 in Bad Homburg v. d. H., Germany, is one of the Directors of Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, Professor in the Graduate School of the University of California, Berkeley and an Honorary Professor at the Ludwig Maximilian University, Munich. He is a Scientific Member of the Max Planck Society and a member of the US National Academy of Sciences.

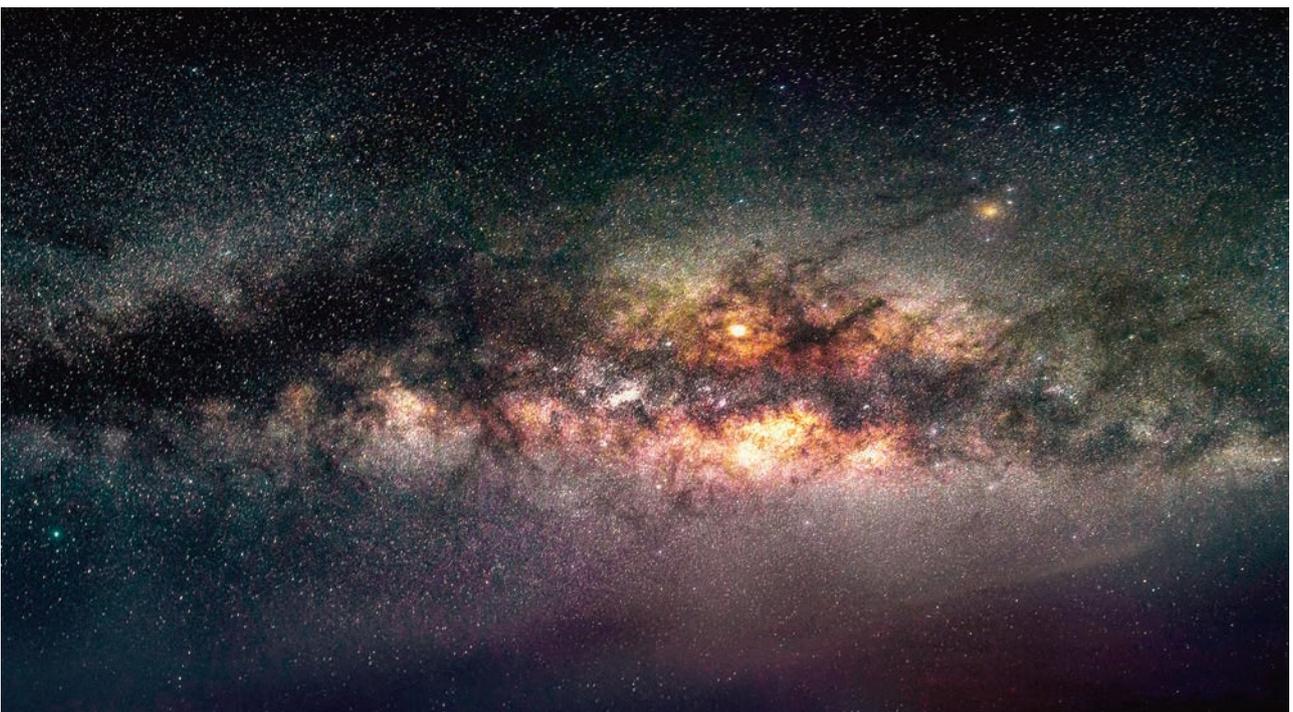
His research interests include astrophysics of galactic nuclei, star formation, kinematics and cosmic evolution of galaxies, massive black holes and experimental infrared, submillimeter and millimeter astronomy.

He has received numerous honours and awards, including the Shaw Prize of The Shaw Prize Foundation and the Crafoord Prize in Astronomy.

In 2020, he received the Nobel Prize in Physics, jointly with Andrea Ghez, for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy

A 40-Year Journey

More than one hundred years ago, Albert Einstein published his Theory of General Relativity (GR). One year later, Karl Schwarzschild solved the GR equations for a non-rotating, spherical mass distribution; if this mass is sufficiently compact, even light cannot escape from within the so-called event horizon, and there is a mass singularity at the center. The theoretical concept of a 'black hole' was born, and was refined in the next decades by work of Penrose, Wheeler, Kerr, Hawking and many others. First indirect evidence for the existence of such black holes in our Universe came from observations of compact X-ray binaries and distant luminous quasars. I will discuss the forty year journey, which my colleagues and I have been undertaking to study the mass distribution in the Center of our Milky Way from ever more precise, long term studies of the motions of gas and stars as test particles of the space time. These studies show the existence of a four million solar mass object, which must be a single massive black hole, beyond any reasonable doubt.



Françoise COMBES

Astrophysicienne à l'Observatoire de Paris, professeure au Collège de France, membre de l'Académie des sciences

Françoise Combes est professeure au Collège de France, sur la chaire «Galaxies et cosmologie». Membre de l'Académie des sciences, elle travaille à l'Observatoire de Paris sur la formation et l'évolution des galaxies, leur dynamique et leur croissance en symbiose avec les trous noirs super-massifs, ainsi que sur des modèles de matière noire. Elle a contribué à mettre en évidence le rôle des noyaux actifs dans la modulation et la suppression de la formation d'étoiles, et notamment dans les amas de galaxies. Elle a reçu plusieurs prix, dont la médaille d'or du CNRS en 2020.



Tout près des trous noirs avec ALMA

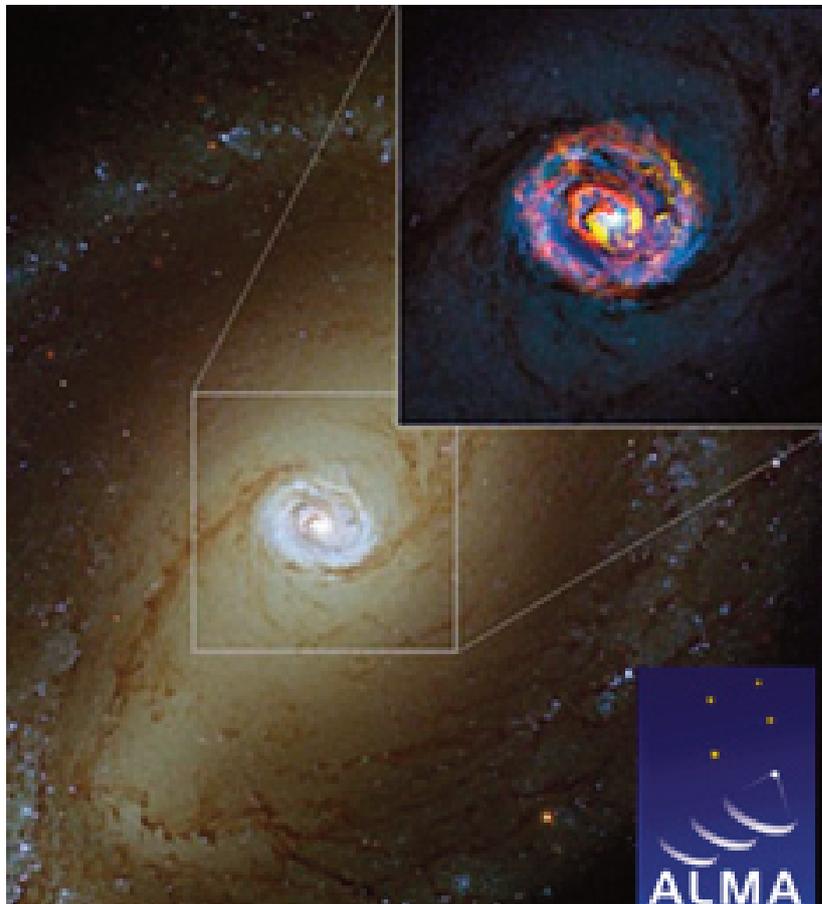
Comment se nourrissent les trous noirs au centre des galaxies ? La haute résolution et grande sensibilité du télescope ALMA permettent de s'approcher du trou noir, et d'entrer dans sa sphère d'influence. Le trou noir se nourrit de gaz qui lui est amené par les mécanismes dynamiques dus aux barres et spirales nucléaires. Alors qu'à l'échelle 100pc, le gaz est parfois bloqué dans un anneau nucléaire, à l'échelle d'environ 10pc (ou 50mas) ALMA révèle l'existence d'un disque moléculaire nucléaire, avec une orientation quelconque par rapport au disque de la galaxie. Une fois alimenté par ce disque ou tore de gaz moléculaire, le noyau actif déborde d'énergie, et soit émet un vent rapide de gaz ionisé, soit un jet radio de particules relativistes, qui entraînent le gaz moléculaire dans la direction perpendiculaire. Les flots de gaz moléculaire sont ainsi fréquemment détectés dans les galaxies actives, et la résolution d'ALMA donne des indices sur leur origine, soit radiative (vent) ou cinétique (jet) ou bien aidé par le vent des supernovae. Dans certains cas, le gaz moléculaire s'échappe de la galaxie, et le noyau actif est donc un moyen de réguler la formation d'étoiles.

Bibliographie :

Audibert, A., Combes, F., Garcia-Burillo, S. et al.: 2021, Smoking-gun evidence of black hole feeding in NGC1808, *A&A* 656, A60

Audibert, A., Combes, F., Garcia-Burillo, S., et al.: 2019, ALMA captures feeding and feedback from the active galactic nucleus in NGC613, *A&A* 632, A33

Combes, F., Garcia-Burillo, S., Audibert, A., et al.: 2019, ALMA observations of molecular tori around massive black holes, *A&A* 623, A79





Nicolas BOUCHÉ

Astrophysicien, chargé de recherche au CNRS, Centre de recherche en astrophysique de Lyon (CRAL)

Nicolas Bouché est spécialiste en spectroscopie à intégral de champ et étudie la formation des galaxies. Il s'intéresse à l'évolution des galaxies en fonction du temps cosmologique et aux phénomènes d'auto-régulation en lien avec les phénomènes de retro-action causé par les vents galactiques. Il a participé à l'exploitation scientifique de SINFONI au MPE, à celle de MUSE sur l'étude des vents galactiques et développé un algorithme 3D pour l'étude de la matière noire dans les galaxies. Il est devenu co-I de HARMONI, le spectrographe à intégral de champ pour le télescope européen ELT de 39m.

MUSE et le rôle des trous noirs sur l'évolution des galaxies

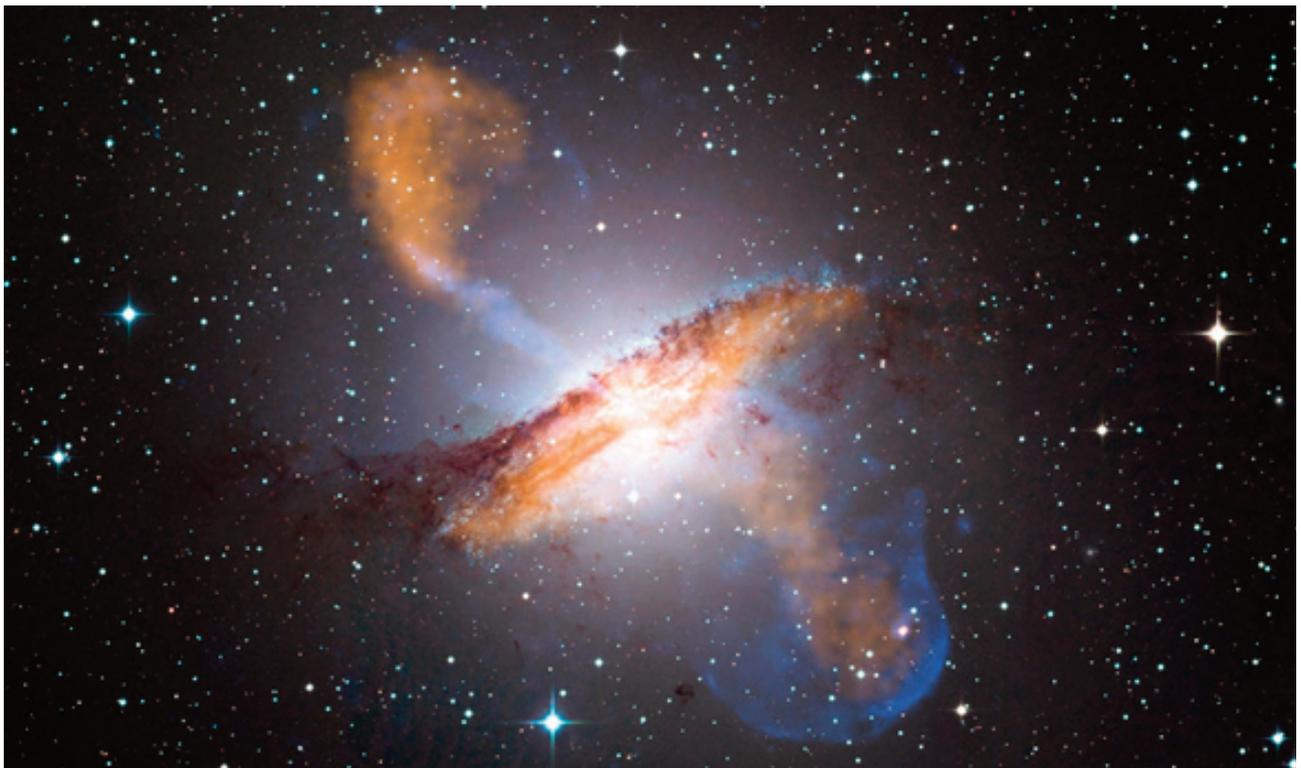
Les galaxies peuvent être divisées en deux catégories : les galaxies spirales et les galaxies elliptiques. Cette classification correspond aussi à la distinction entre les galaxies actives qui forment des étoiles et passives qui n'en forment plus. Un des mystères de la formation des galaxies est d'expliquer comment les galaxies arrêtent de former de nouvelles étoiles, surtout dans un univers où il y a beaucoup de matière disponible autour des galaxies qui est disponible pour relancer le processus de formation des étoiles. Une solution possible à ce mystère est le phénomène de rétro-action causé par les trous noirs massifs au centre des galaxies qui éjecteraient énergétiquement beaucoup de matière, le paramètre important étant la masse du trou noir. Des avancées méthodologiques et technologiques (en particulier avec la spectroscopie à intégral de champ, spectro-imagerie dite de "3D") permettent de mesurer la masse de ces trous noirs massifs dans les galaxies. Cet exposé introduira ces avancées et la technique de spectrographie 3D et fera également le bilan sur les effets supposés et connus des trous noirs massifs sur l'évolution des galaxies.

Bibliographie :

Kormendy & Ho 2013, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 51, 4, <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082708-101811>

Bacon R. 2017 « MUSE and Beyond: Prospects for Integral Field Spectroscopy at ESO » in Reaching New Heights in Astronomy 2017, <https://zenodo.org/record/1239571>

Krajinovic et al. 2009, MNRAS, 399, 1839 <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15415.x>



Guy PERRIN

Astronome à l'Observatoire de Paris, laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (LESIA)

Guy Perrin est spécialiste des techniques de haute résolution angulaire dans le domaine optique et s'intéresse à leurs applications aux étoiles évoluées, aux noyaux actifs de galaxies et au trou noir super-massif au centre de notre galaxie, Sgr A*. Il a été Co-PI de l'instrument MIDI de l'ESO/VLTI, a dirigé l'équipe 'OHANA qui a démontré la recombinaison de télescopes optiques par fibres monomodes et est le responsable de la contribution française à l'instrument GRAVITY dont l'objectif phare est l'étude de Sgr A* et les tests de la relativité générale en champ fort.



Voyage au cœur des galaxies actives

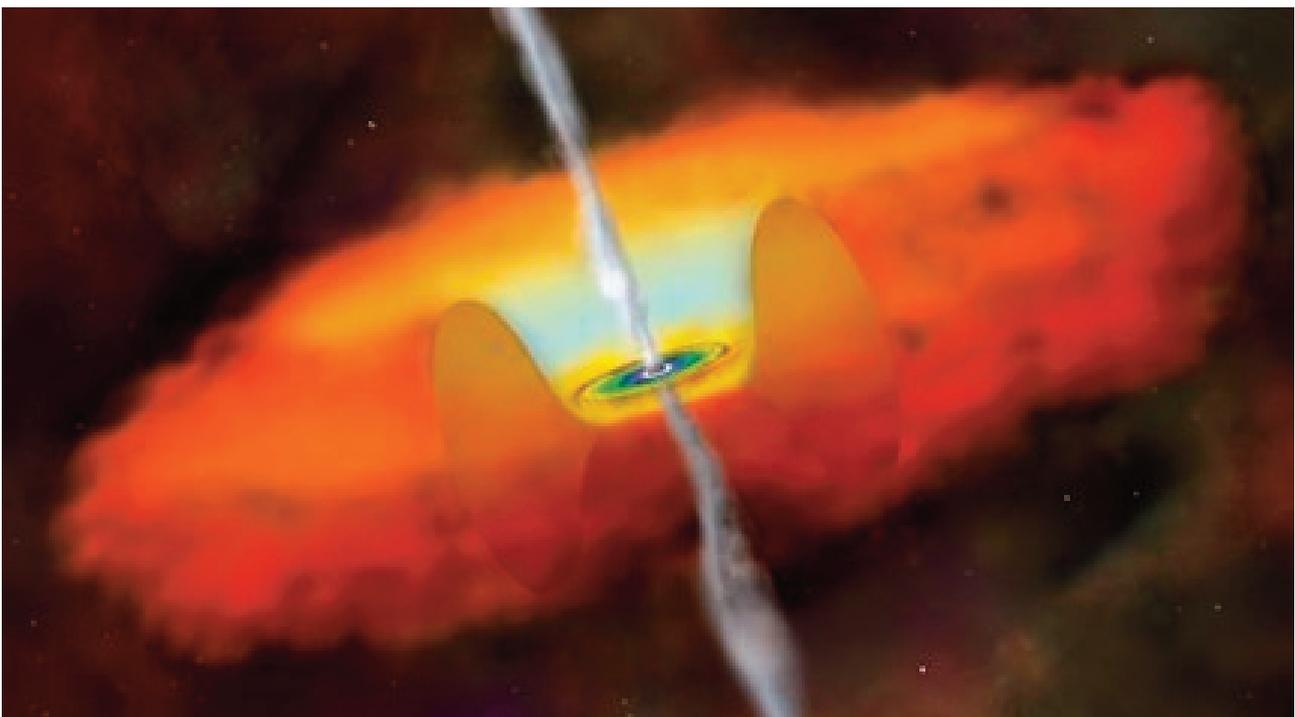
Le cœur des galaxies est occupé par un trou noir super-massif de plusieurs millions à plusieurs milliards de masses solaires qui joue un rôle important dans l'évolution de la galaxie hôte. Bien que la taille physique des trous noirs soit grande, leur distance les rend extraordinairement petits en apparence. Leur étude passe donc par des méthodes indirectes reposant sur les effets induits sur leur environnement. Il est pour cela nécessaire que ces trous noirs soient dans une phase active, phase qui a culminé il y a 10 milliards d'années. Toutes les galaxies ne sont donc pas propices à ces études. Les progrès de l'instrumentation ont rendu possible l'étude quasi *in situ* de certains de ces noyaux actifs et de leurs trous noirs centraux. La confrontation des études directes et indirectes est indispensable pour étalonner les lois qui permettent d'estimer les masses de trous noirs. L'interférométrie optique y contribue et a permis, avec l'instrument GRAVITY, la mesure directe de la masse du trou noir au centre du quasar 3C273. Nous verrons quelles étapes ont abouti à cette mesure et les perspectives dans ce domaine.

Bibliographie :

R. Antonucci, « Unified models for active galactic nuclei and quasars », *ARA&A* 31, 473 (1993)

Gravity Collaboration et al., « Spatially resolved rotation of the broad-line region of a quasar at sub-parsec scale », *Nature* 563, 657 (2018)

Gravity Collaboration et al., « First light for GRAVITY: Phase referencing optical interferometry for the Very Large Telescope Interferometer », *A&A* 602, A94 (2017)





INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Inscriptions ouvertes au public dans la limite des places disponibles.

www.academie-sciences.fr

(rubrique «prochains évènements»)

