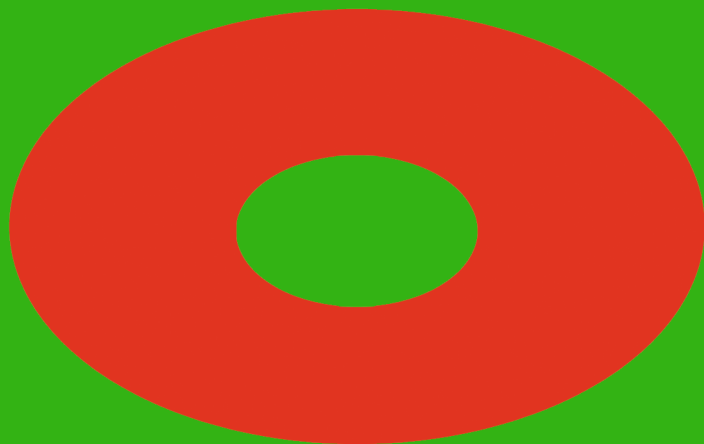


**FRANÇOISE COMBES**

# **TROUS NOIRS ET QUASARS**



**LES GRANDES VOIX DE LA RECHERCHE**

**CNRS EDITIONS**

**DE VIVE VOIX**



## Présentation de l'éditeur



Pionnière du domaine, Françoise Combes est spécialiste de la dynamique des galaxies : mêlant observation et simulation numérique, elle cherche à comprendre la relation entre la forme des galaxies et leur histoire, et à décoder les différentes étapes de leur croissance. La physique des trous noirs est pour cela indispensable : les trous noirs supermassifs situés au centre des

galaxies y jouent un rôle majeur.

Comment sont-ils alimentés ? Comment recrachent-ils de la matière ? Avec quelles conséquences sur la formation des étoiles au sein de la galaxie correspondante ? Que peut nous apprendre l'observation des quasars, ces galaxies dont le trou noir supermassif central est extrêmement actif, et qui émet une lumière mille fois plus forte que toutes les étoiles de la galaxie réunies ?

Les objets célestes les plus impressionnants de l'Univers sont ici décryptés par une pionnière de l'étude du cosmos.

*Médaille d'or du CNRS, Françoise Combes est astrophysicienne, professeur au Collège de France.*



Françoise Combes

# Trous noirs et quasars

CNRS ÉDITIONS

DE VIVE VOIX

La version audio du présent ouvrage  
est disponible à l'achat sur le site [www.devivevoix.com](http://www.devivevoix.com)

Couverture : Paul Cox

© CNRS Éditions / De Vive Voix,  
coll. « Les Grandes Voix de la Recherche »,  
Paris, 2021.

ISBN : 978-2-271-13676-3

ISSN : 2680-2708

[www.cnrseditions.fr](http://www.cnrseditions.fr)  
[www.devivevoix.com](http://www.devivevoix.com)

## **Les Grandes Voix de la Recherche**

Une collection CNRS Éditions / De Vive Voix

Donner la parole aux lauréats et lauréates de la médaille d'or du CNRS, la plus prestigieuse récompense scientifique française : telle est l'ambition de la collection Les Grandes Voix de la Recherche.

En des textes courts et vivants, les médailles d'or retracent leur parcours, nous transmettent leur passion, nous présentent leurs travaux. Grâce à des contenus accessibles et à jour des dernières avancées scientifiques, ils nous introduisent au meilleur de la recherche française.

En passeurs et médiateurs, ces grandes voix de la recherche explorent tous les domaines de la connaissance et présentent de manière claire les grands défis de la science.

À écouter ou à lire, ces grandes voix de la recherche sont disponibles sous forme de livre audio et de livre papier.



Françoise Combes à l'observatoire de Paris, en 2020.

© Frédérique PLAS / LERMA / CNRS Photothèque.



## L'expansion de l'Univers

L'astrophysique m'a fascinée dès le début de mes études, et, lorsqu'il a fallu choisir un thème pour une thèse de troisième cycle, j'étais passionnée par la cosmologie. On ne savait alors pas exactement expliquer la formation de la matière elle-même. J'ai donc commencé par la modéliser avec Évry Schatzman et Roland Omnès. Je me suis dirigée vers un modèle, assez fantaisiste finalement, d'égalité entre matière et antimatière. Si l'on pense aujourd'hui que matière et antimatière doivent posséder une légère asymétrie, on ne sait toujours pas pourquoi : l'hydrogène et l'anti-hydrogène se comportent de la même façon dans l'accélérateur du CERN. Mais on est obligé de supposer

l'existence d'un excès d'un milliardième de la matière sur l'antimatière tout simplement pour expliquer pourquoi nous sommes là : sans cette hypothèse, il n'y aurait pas de galaxies.

Roland Omnès proposait alors une autre théorie : matière et antimatière existerait exactement dans les mêmes quantités dans l'Univers, une émulsion séparant les deux, un peu comme celle composée d'huile et de vinaigre. Il existerait donc des galaxies de matière, et des galaxies d'antimatière. Mais cela supposait, lors d'une rencontre entre les deux, énormément d'annihilation de matière et d'antimatière, produisant de fortes émissions de rayons gamma. C'était un des problèmes de cette théorie, cette prédiction de rayons gamma en grand nombre, qui n'ont pas été observés. Jean-Loup Puget et Floyd Stecker, qui travaillaient alors sur cette observation, pensaient que c'était absolument impossible. De mon côté, j'ai mené des travaux sur le sujet pendant un an, pour expliquer la synthèse des éléments légers comme l'hélium ou le deutérium dans le cadre de cette théorie. Et ça ne fonctionnait pas non plus. Voici un

exemple d'une théorie qui n'a pas duré longtemps...

Ces travaux constituaient pour moi une première approche de la recherche en cosmologie qui, aujourd'hui encore, est tout à fait passionnante. En 40 ans de recherches, l'astrophysique a considérablement progressé et fait de nombreuses découvertes. Par exemple, on sait de quoi est constitué l'Univers, avec 5 % de matière ordinaire et 25 % de matière noire invisible encore indéterminée (elle est en fait plutôt transparente que noire), que nous ne voyons pas, mais détectons tout de même grâce à sa gravité. Les 70 % restant sont constitués d'énergie noire, dont l'existence a été découverte en 1998. Cette année-là, des galaxies, que l'on pensait être à une certaine distance, calculée par la loi de Hubble (la loi de l'expansion de l'Univers, selon laquelle plus une galaxie est lointaine, plus elle semble s'éloigner rapidement), nous ont fourni des indicateurs de distance, des supernovæ de type 1A, qui sont des chandelles standards. Les chandelles standards sont des objets variables sur une échelle de

temps proportionnelle à leur luminosité intrinsèque. Une fois mesurée leur échelle de temps de variation, leur luminosité intrinsèque est déterminée, et donc aussi leur distance, par la mesure de leur luminosité apparente (car l'intensité de la lumière reçue est inversement proportionnelle au carré de la distance). Ces mesures ont montré que leur galaxies-hôtes étaient beaucoup plus loin que ce que l'on avait prédit.

Nous étions donc dans l'obligation de conclure que l'expansion de l'Univers était accélérée, ce qui pose un gros problème. Les lois de la gravité disent en effet que toute la matière qu'il y a dans l'Univers s'attire : cette attraction devrait freiner l'expansion. Nous pensions donc que l'Univers était soumis à une décélération, et l'on a constaté à l'inverse que son expansion était accélérée. Il nous fallait alors une force répulsive plutôt qu'attractive. Nous avons donc, en conséquence, inventé cette « énergie noire », dont on ignore toujours ce qu'elle est, peut-être simplement la manifestation de la constante cosmologique dans les équations d'Einstein.

Car Einstein, au début du xx<sup>e</sup> siècle, avait supposé une telle constante selon le raisonnement suivant : l'Univers est statique, il ne bouge pas, il est éternel, et, pour qu'il n'y ait pas d'expansion, il faut une constante cosmologique. Plus tard, il a cru avoir fait là la plus grande erreur de sa vie. Peu à peu, on a compris que l'Univers était bien en expansion, et cette constante est devenue inutile. Jusqu'en 1998, elle n'a plus été évoquée. Et puis tout d'un coup on découvre que l'Univers est en expansion accélérée, et qu'on a besoin d'une énergie noire, ou d'une constante

La cosmologie continue de faire d'énormes progrès. On a désormais exploré tout l'Univers jusqu'au Big Bang. En astrophysique, lorsque l'on regarde loin, on remonte le temps, puisque les objets situés à, par exemple, 10 milliards d'années-lumière, ont envoyé il y a 10 milliards d'années ce photon qui nous parvient aujourd'hui. Il a été émis lorsque la galaxie dont il provient était très jeune. Il est donc possible de voir des objets très jeunes, et de

remonter jusqu'au Big Bang, grâce au télescope spatial Hubble, par exemple.

Contrairement à ce que l'on a longtemps pensé, l'Univers n'est pas éternel, il a un âge fini (13,8 milliards d'années environ) : cela signifie que la lumière des objets situés au-delà de 13,8 milliards d'années-lumière de nous n'a pas eu le temps de nous parvenir, et qu'ils nous demeurent invisibles. Cette limite de visibilité est nommée « horizon cosmologique ». Nous pouvons désormais remonter jusqu'à cet horizon observable de la cosmologie, ce qui représente une avancée considérable. Mais d'un autre côté, on observe 25 % de matière noire, et 95 % de secteur noir, sans pouvoir déterminer leur nature. La discipline progresse néanmoins constamment. Ainsi, dans les vingt dernières années, six prix Nobel de physique ont été décernés à l'astrophysique, alors que cette discipline ne correspond qu'à 10 % de la physique. L'un des enjeux à venir serait de découvrir ce qui est caché derrière tout ce secteur noir, peut-être une modification de la

gravité que beaucoup d'astronomes sont en train de construire...

L'Agence spatiale européenne va, en 2022, lancer le télescope Euclid qui aura essentiellement pour but d'observer 12 milliards d'objets dont un milliard de galaxies – ce qui est déjà une considérable gageure – et permettra d'échantillonner l'expansion de l'Univers en fonction du temps. La distance de ces galaxies tout au long de l'âge de l'Univers va permettre de déduire la loi de l'expansion, et ainsi de déterminer quand elle a commencé à ré-accélérer, après une première période de décélération. Cette loi de l'expansion va nous donner l'évolution en fonction du temps de l'énergie noire, et montrera ainsi s'il s'agit d'un composant dynamique, ou si l'on peut l'assimiler à une constante cosmologique. Dans le premier cas, ce serait un cinquième élément, une quintessence. De nombreuses autres découvertes sont à prévoir dans les dix prochaines années.





## Les trous noirs

Les trous noirs sont des objets très mystérieux, tellement compacts et massifs qu'il faut pour en sortir avoir une vitesse très importante, et même, à partir d'un certain rayon, beaucoup plus grande que celle de la lumière : cela signifie que même la lumière ne peut sortir d'un trou noir. On pourrait alors penser qu'ils sont complètement invisibles. En fait, paradoxalement, ce sont des objets extrêmement lumineux, puisque la matière, en tombant sur un trou noir, perd sa considérable énergie gravitationnelle, et la transforme en partie en rayonnement, par l'intermédiaire d'ondes de choc. Ainsi, les quasars, qui sont les noyaux actifs de galaxies abritant un trou noir supermassif,

sont-ils les objets les plus lumineux de l'Univers.

La première question que l'on s'est posé est la suivante : les trous noirs existent-ils vraiment ? Au printemps 2019, nous avons eu le plaisir d'une grande nouvelle : une équipe est parvenue à capturer l'image de l'ombre d'un trou noir. Cette équipe était celle de l'Event Horizon Telescope, littéralement « télescope de l'horizon des événements », constitué d'un ensemble de télescopes radio-astronomiques opérant l'un au Japon, l'autre aux États-Unis, un troisième au Chili, un en France, etc. Cet ensemble se sert du diamètre de la Terre pour faire un interféromètre. Il a donc la résolution spatiale qu'aurait un télescope de 12000 km de diamètre. Cet Event Horizon Telescope a observé la galaxie Messier 87, la plus grosse galaxie au centre de l'amas de la Vierge, avec une résolution de 40 micros arc seconde, (c'est extrêmement fin). Il a permis de décrire avec beaucoup de détails tout le gaz ionisé qui tourne autour du trou noir de Messier 87, particulièrement massif, de 6 milliards de masses solaires. Ce gaz, qui émet un rayonnement dans

les ondes millimétriques et radio-millimétriques, a alors été étudié. Et le trou noir a révélé une certaine ombre. On aperçoit un trou beaucoup plus grand que le trou noir lui-même, mais aussi plus grand que l'horizon des événements (le rayon à partir duquel il faudrait avoir une vitesse plus grande que celle de la lumière pour s'échapper, et donc en-deçà duquel on ne peut plus rien voir). Tous les rayons lumineux tombent dans cette ombre, et n'en ressortent pas.

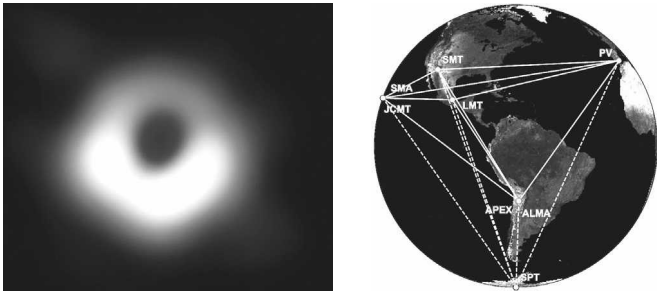


Image de l'ombre du trou noir au centre de la galaxie Messier 87 (à gauche), obtenue avec l'EHT (Event Horizon Telescope), qui est une combinaison de plusieurs télescopes en ondes millimétriques sur tous les continents (à droite). Event Horizon Telescope Collaboration, 2019.

On observe un trou noir au centre, et quelque chose de très lumineux qui tourne

autour : le disque d'accrétion. Cette observation a permis de déduire des informations sur la masse du trou noir, et c'est une réussite fantastique. On savait, bien entendu, que cette galaxie Messier 87 avait un noyau actif : son trou noir avale et rejette beaucoup de matière, ainsi qu'un jet de gaz ionisé, que l'on appelle «jet radio». Ce jet est tellement puissant et rapide qu'il se déplace à une vitesse comparable à celle de la lumière, et il s'étale jusqu'à 10 ou 100 fois le rayon de la galaxie. C'est extrêmement énergétique. L'activité de ce trou noir est suivie depuis longtemps, mais son ombre a été obtenue après 3 jours d'observations : l'image a été reproduite en Une de tous les journaux.

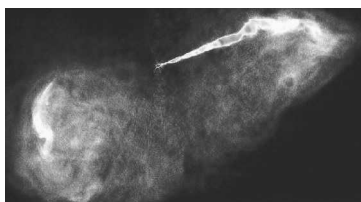


Image du jet radio sortant du centre de la galaxie Messier 87 : les particules chargées voyagent à presque la vitesse de la lumière au début, puis ralentissent dans les lobes radio. La taille verticale de l'image est 8 000 années-lumière.VLA, NRAO.



Retrouvez tous les ouvrages de CNRS Éditions  
sur notre site [www.cnrseditions.fr](http://www.cnrseditions.fr)