

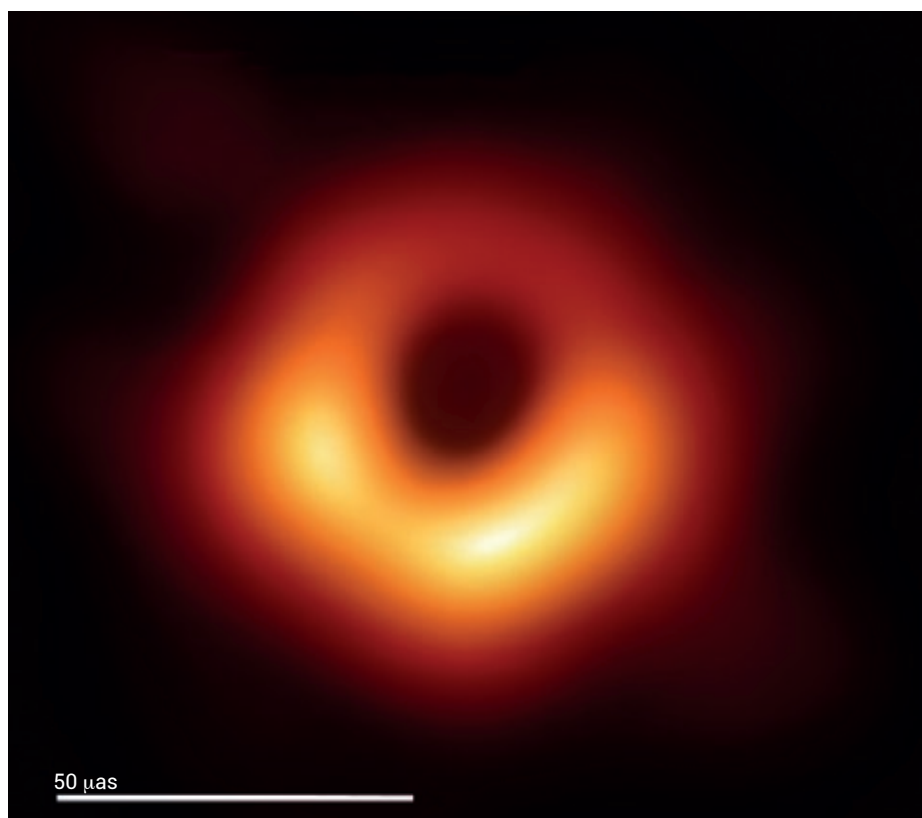
# Première image d'un trou noir

Françoise Combes (francoise.combes@obspm.fr)

LERMA (UMR CNRS 8112), Observatoire de Paris, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris

La nouvelle est arrivée le 10 avril 2019 : une grande collaboration internationale d'astronomes a réussi à réaliser l'image d'un trou noir supermassif, tel qu'il en existe dans pratiquement tous les noyaux de galaxies [1].

Il s'agit du trou noir au centre de la galaxie Messier 87 (M87), galaxie principale de l'amas de la Vierge, situé à 50 millions d'années-lumière de la Terre, et dont la masse est de  $6,5 \cdot 10^9$  masses solaires ( $M_{\text{sol}}$ ).



**1. Image du trou noir au centre de la galaxie Messier 87, obtenue par la collaboration EHT (Event Horizon Telescope).** L'ombre du trou noir est mise en évidence par le gaz chaud et ionisé qui tourne autour, dans un disque d'accrétion, à une vitesse relativiste. L'axe de rotation du disque est orienté de 20 à 30 degrés par rapport à la ligne de visée. L'émission du gaz n'est pas symétrique, car elle est amplifiée par les effets relativistes lorsque le gaz s'approche de nous. La barre donne l'échelle en microsecondes d'arc ( $\mu\text{as}$ ), et correspond environ à 5 jours-lumière, à la distance de M87.

L'image (fig. 1) a été obtenue avec huit radiotélescopes répartis sur le globe terrestre, agissant comme un interféromètre géant, afin de bénéficier de la plus grande ligne de base possible : le diamètre de la Terre (fig. 2). La résolution angulaire des images obtenues est en effet fonction de la distance  $D$  (ou ligne de base) entre les couples de télescopes, qui reçoivent les signaux cohérents émis par la source. La résolution est plus précisément proportionnelle à  $\lambda/D$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde.

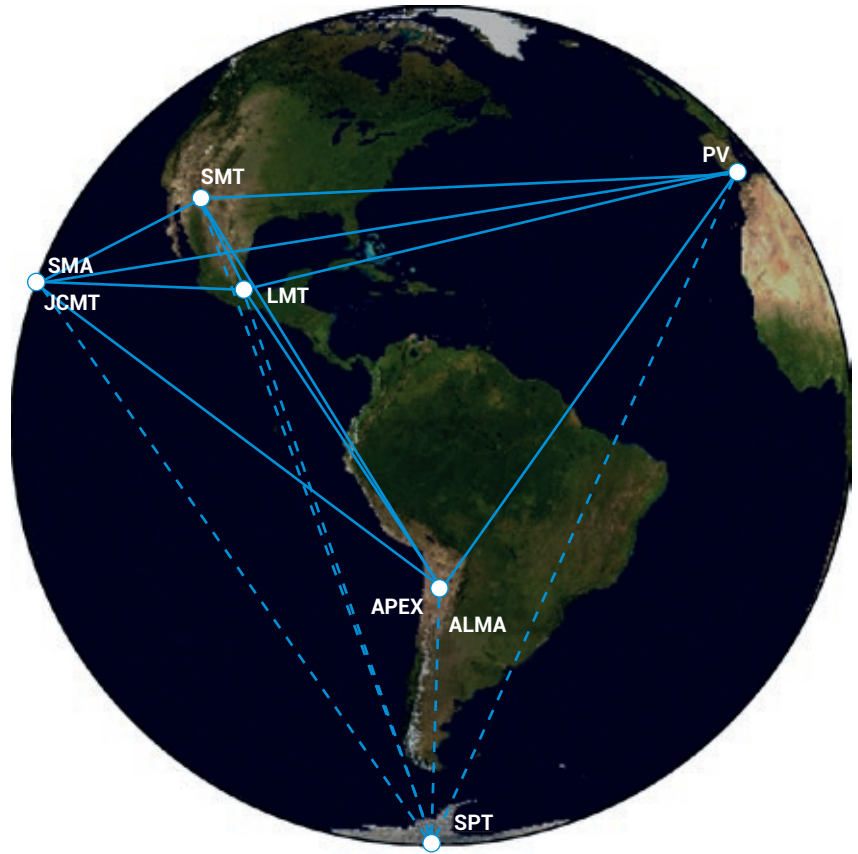
Des observations à  $\lambda$  de l'ordre du centimètre sont effectuées couramment, mais leur résolution angulaire est insuffisante. Les présentes observations ont donc été faites dans la longueur d'onde de 1,3 mm, ce qui donne une résolution de 20 microsecondes d'arc (soit 20  $\mu\text{as}$ ). C'est un exploit, car l'atmosphère pose des problèmes à cette longueur d'onde, où les effets de la vapeur d'eau sont très sensibles. L'indice optique de l'eau est 30% plus grand que celui de l'air, et la présence de >>>

>>>

vapeur d'eau peut modifier sensiblement et aléatoirement l'indice global, selon l'humidité. La turbulence de régions de l'atmosphère de différents indices optiques produit alors un brouillage des images et une perte de cohérence de la phase des signaux. De plus, il existe une limite supérieure intrinsèque à la longueur d'onde utilisable, car l'image d'une source est brouillée par la diffusion au cours de la traversée de régions ionisées dans le milieu interstellaire des galaxies, ou même dans le milieu interplanétaire du système solaire (ces régions ionisées diffusent le signal de façon proportionnelle à  $\lambda^2$ ). Par exemple, la mesure de la taille de la source radio centrale de notre Galaxie, appelée Sagittarius A\* (SgrA\*), ne peut être obtenue qu'à des longueurs d'onde inférieures à 2 mm. Dans le cas de M87, la diffusion empêche les observations à des  $\lambda$  supérieures à 2,5 mm.

Un trou noir est un objet compact, au voisinage duquel la gravité est si forte que la vitesse requise pour s'en échapper est supérieure à la vitesse de la lumière. La distance où cela se produit définit une sphère appelée l'horizon des événements, car aucune matière ni aucune information sur ce qui se passe à l'intérieur ne peut en sortir. Le rayon  $R_h$  de l'horizon est proportionnel à la masse  $M$  du trou noir :  $R_h = 2 GM/c^2$ , où  $G$  est la constante de gravitation, et  $c$  la vitesse de la lumière. Il n'est possible de visualiser le trou noir que par le rayonnement du gaz qui tourne autour, proche de l'horizon. Ce gaz est capturé par le trou noir avec son moment cinétique propre, indépendamment de celui du trou noir, et de direction aléatoire à chaque accréation ; c'est ainsi qu'est défini l'axe du disque d'accréation. L'inclinaison est l'angle entre la direction du moment cinétique et la ligne de visée, soit un angle nul pour un disque que nous voyons de face. Le disque d'accréation dans M87 est incliné de 20 à 30 degrés. La période de rotation de la matière dans ce disque est elle aussi proportionnelle à la masse du trou. Le gaz ionisé qui rayonne autour de M87 met près de 50 jours à faire un tour.

La masse du trou noir joue le rôle d'une lentille gravitationnelle. Elle dévie les rayons lumineux émis par le gaz. Les rayons provenant du disque derrière le trou noir sont déviés au-dessus et au-dessous de ce dernier. Ainsi, l'observateur peut voir un halo de lumière autour du trou noir. Pour qu'un rayon lumineux puisse échapper à



2. Les divers télescopes de la collaboration EHT sur le globe terrestre, qui ont participé aux observations les 5, 6, 10 et 11 avril 2017 : SPT, South Pole Telescope ; ALMA, Atacama Large (sub)Millimeter Array (Chili) ; APEX, Atacama Pathfinder EXperiment (Chili) ; LMT, Large Millimeter Telescope (Mexique) ; SMT, SubMillimeter Telescope (Arizona, USA) ; SMA, SubMillimeter Array (Hawaii) ; JCMT, James Clerk Maxwell Telescope (Hawaii) ; PV, Pico Veleta, i.e. télescope de 30 mètres de l'IRAM (Espagne).

M87, située dans le ciel de l'hémisphère Nord, est visible de tous les télescopes, sauf du pôle Sud (SPT). Les lignes continues représentent les lignes de base (couples de télescopes) qui ont pu observer M87, et les lignes en tirets, les bases qui n'ont servi qu'aux sources de calibration. Les télescopes localisés au Chili et SPT sont en revanche nécessaires pour observer SgrA\*, située dans le ciel de l'hémisphère Sud.

l'attraction du trou et parvenir jusqu'à nous, il lui faut un paramètre d'impact minimum de  $2,6 R_h$ . Les rayons lumineux passant plus près de l'horizon sont si déviés qu'ils « tombent ». Le trou noir lui-même apparaît ainsi comme une ombre approximativement circulaire au centre de l'image, avec un rayon égal à  $2,6 R_h$ , soit 20 microsecondes d'arc pour M87. L'image du halo serait la même pour un disque très incliné, presque vu par la tranche (ce qui n'est pas le cas de M87), la principale différence étant qu'une partie du disque se projette en avant-plan de l'ombre du trou noir, et qu'alors la zone centrale de l'image n'apparaîtrait pas complètement sombre.

La collaboration Event Horizon Telescope EHT<sup>(a)</sup> a bien sûr essayé de faire l'image du trou noir de notre propre galaxie, la Voie lactée. Ce trou noir (SgrA\*) est bien plus proche de nous, à 25 000 années-lumière, soit 2000 fois plus proche que M87. Par coïncidence, le rapport des masses des trous noirs respectifs est aussi proche de 2000 : SgrA\* a une masse de  $4 \cdot 10^6 M_{\text{sol}}$ . Comme le rayon de l'horizon, et donc celui de l'ombre du trou noir, est proportionnel à la masse, la taille de notre trou noir SgrA\* est bien plus petite que celle de M87. Mais comme il est plus proche, la taille angulaire attendue est très similaire. Le gaz ionisé qui rayonne autour de SgrA\* met 45 minutes à faire un tour.



Cette période a pu récemment être mesurée grâce à l'observation de sursauts d'émission infrarouge proche (2 mm de longueur d'onde) autour de SgrA\* par la collaboration GRAVITY<sup>(b)</sup>. Cet interféromètre infrarouge très performant a suivi les points lumineux de plusieurs sursauts dans leurs orbites proches de l'horizon de SgrA\*, à 30% de la vitesse de la lumière. Ces orbites sont quasi circulaires, de rayon de l'ordre de 50 mas. La lumière détectée correspond à un pic d'émission synchrotron infrarouge du gaz faisant partie du disque d'accrétion.

Cette variabilité est liée au rythme d'accrétion de gaz des trous noirs supermassifs. L'accrétion n'est pas continue, mais des nuages de gaz de diverses tailles et masses sont capturés par le trou avec leur moment cinétique propre. Le gaz stationne pendant une ou plusieurs rotations dans le disque, puis tombe dans le trou ; ensuite, le trou noir « jeune » jusqu'à son prochain « repas ». Ces épisodes d'accrétion durent moins d'une heure dans SgrA\*, et plusieurs mois dans M87.

Il est donc beaucoup plus difficile de faire l'image du disque d'accrétion autour de SgrA\*, composé de points lumineux variables qui restent brillants pendant un quart d'heure environ, que l'image du disque plus tranquille de M87, qui est resté stable pendant les quelques jours d'observation de la collaboration EHT en avril 2017. Pendant quatre jours, une quantité considérable de données a été stockée par chaque télescope de l'expérience EHT, puis il a fallu deux ans pour calibrer ces données, et essayer de combiner les données cohérentes, en éliminant beaucoup d'artefacts. Pour le trou noir de M87, le résultat se révèle tout à fait compatible avec ce qui était attendu des modèles. En revanche, pour SgrA\* les problèmes de calibration et de variabilité de la source ont empêché de réaliser l'image du disque d'accrétion ; l'expérience sera tentée à nouveau avec plus de télescopes (donc plus de sensibilité), et notamment avec l'interféromètre NOEMA de l'IRAM<sup>(c)</sup>. ■

(a) La collaboration EHT ou Event Horizon Telescope rassemble plus d'une douzaine de radiotélescopes de toutes les régions du globe. Plus d'une trentaine d'instituts y participent. Les observations ont commencé en 2006, et la collaboration n'a fait que croître et devenir plus performante depuis.

(b) GRAVITY est un instrument de 2<sup>e</sup> génération sur le Très Grand Télescope (VLT) européen au Chili. Il permet de combiner les faisceaux provenant des quatre télescopes de 8 mètres, et de faire de l'interférométrie à grande base (maximum 130 m) en infrarouge proche ( $\lambda = 2 \mu\text{m}$ ), en utilisant l'optique adaptative.

(c) NOEMA est un interféromètre composé de douze radiotélescopes, observant dans le domaine des longueurs d'ondes millimétriques, et situé sur le Plateau de Bure, près de Grenoble. Il est opéré par l'IRAM, Institut de RadioAstronomie Millimétrique, organisme franco-allemand-espagnol.

### Références

- 1• The Event Horizon Telescope Collaboration, "First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole", *ApJ* **875** (2019) L1.
- 2• GRAVITY Collaboration, "Detection of orbital motions near the last stable circular orbit of the massive black hole SgrA\*", *A&A* **618** (2018) L10.