

Une nouvelle prouesse de Gravity : Il mesure avec précision la masse des trous noirs supermassifs

Nous avons souvent rappelé dans ces colonnes que dans le cœur de toutes les grandes galaxies se cache un trou noir « supermassif » de plusieurs millions à plusieurs milliards de fois la masse du Soleil. Les « quasars », qui résident au centre de galaxies très lointaines, en sont les exemples les plus lumineux, mais il existe près de nous des objets semblables moins spectaculaires, les « noyaux actifs de galaxies ». Déterminer les masses de ces trous noirs a constitué depuis une quarantaine d'années un objectif important pour de nombreuses équipes d'astronomes.

Comment évoluent ces trous noirs et quelles sont leurs relations avec les galaxies dont ils sont les hôtes, telle est en effet la question qui taraude les astronomes depuis des décennies. Une méthode puissante appelée « cartographie par réverbération » a été développée pour déterminer leurs masses.

Avant d'expliquer cette méthode, il nous faut rappeler certaines propriétés des quasars et des noyaux actifs de galaxies. Nous savons que leur éclat provient de l'environnement immédiat du trou noir, où la matière attirée par la gravité rayonne intensément juste avant de disparaître à tout jamais. L'éclat varie donc en fonction de la quantité de matière qui parvient jusqu'au trou noir. Par ailleurs, l'une des caractéristiques de ces objets est l'existence de raies spectrales larges dont l'intensité varie au cours du temps, car elles proviennent de nuages excités par la lumière provenant du centre. L'élargissement de ces raies est dû à « l'effet Doppler », et il permet de déterminer la vitesse des mouvements du gaz. Ceux-ci sont très rapides - plusieurs milliers de kilomètres par seconde - et correspondent soit à de la rotation, soit à des flots expulsés vers l'extérieur, soit aux deux. Comme on ignore la structure de la région, on ne peut déterminer qu'une vitesse moyenne. Par ailleurs, la loi de la gravitation universelle nous dit que, pour une distance donnée à une masse centrale, plus cette dernière est grande, plus les mouvements sont rapides. On peut donc déduire la masse centrale si l'on connaît, en plus de la vitesse moyenne des nuages émettant les raies spectrales, leur distance au trou noir. Or cette distance correspond pour les objets les plus proches de nous à un angle inférieur à un dixième de milliseconde d'arc, ce qui la rendait jusqu'à maintenant totalement inaccessible à l'observation directe.

Un moyen indirect avait été inventé dès le début des années 1980 pour mesurer cette distance : il s'agissait de déterminer le temps t que met la lumière (émise tout près du trou noir, rappelons-le) pour parvenir aux nuages produisant les raies spectrales. On en déduit la distance, $t \times c$, c étant la vitesse de la lumière. On a donc suivi pendant plusieurs années les variations d'éclat d'une soixantaine de quasars et de noyaux actifs de galaxies, et celles de l'intensité des raies spectrales, et on a mesuré leur décalage ; on déduisait ainsi la distance de la région émettant des raies spectrales, et en conséquence la masse des trous noirs. Mais ce faisant, on a découvert **une relation inattendue** : la distance est à peu près proportionnelle à la racine carrée de la luminosité (rappelons que la luminosité est connue, puisque la distance des objets est donnée par le décalage spectral - c'est la loi de Hubble). L'existence de cette relation a été une heureuse découverte puisqu'elle a permis de déterminer cette distance sans qu'il soit nécessaire

de suivre les variations d'intensité, ce qui avait mobilisé pendant de nombreuses années plusieurs télescopes entièrement dédiés à ces observations ! En appliquant cette relation, on a ainsi pu **déterminer les masses de milliers de quasars et de noyaux actifs de galaxies**, et c'est ainsi qu'on a découvert une autre relation, cette fois encore inattendue et qui a été à l'origine de nombreuses recherches : la masse du trou noir est égale à quelques millièmes de la masse du bulbe de la galaxie-hôte (dont la taille est cent mille fois plus grande) !

Comme on peut le deviner, les masses déterminées par cette méthode sont entachées d'une incertitude assez grande, de l'ordre d'un facteur trois (rappelons toutefois que les masses en question varient d'un facteur dix mille entre les plus petites et les plus grandes). Il était donc très important de pouvoir faire cette mesure avec plus de précision. Et c'est ici qu'intervient l'instrument *Gravity* décrit par Guy Perrin dans le numéro d'octobre de *l'Astronomie*, 2016, 98, vol 130, p. 22. Installé depuis deux ans sur le VLT au Chili, il combine les faisceaux lumineux des quatre télescopes de huit mètres, qui deviennent ainsi l'équivalent d'un télescope de 130 mètres de diamètre, tout en utilisant à la fois un système d'optique adaptative et un spectrographe imageur. *Gravity* atteint alors une résolution spatiale de $1/10\,000''$, qui permettrait de déceler une pièce de 1 euro posée sur la Lune !

Une équipe internationale comprenant des chercheurs du CNRS, de l'Observatoire de Paris - PSL, de l'Université Grenoble-Alpes et de l'Observatoire de la Côte d'Azur ont utilisé *Gravity* pour observer le cœur de 3C 273, le premier quasar identifié en 1963, situé au centre d'une galaxie distante d'environ 2,5 milliards d'années-lumière. Ce quasar possède un jet très fin rayonnant depuis le domaine radio jusqu'au domaine des rayons gamma (Figure 1). *Gravity* résoud une région de l'ordre d'une année-lumière. La raie de l'hydrogène Paschen alpha présente dans cette région un gradient de vitesse correspondant sans ambiguïté à une rotation : la structure est celle d'un disque épais, tournant avec une vitesse de plusieurs milliers de kilomètres par seconde autour d'un axe correspondant au jet (Figures 2 et 3). À partir de ce résultat, l'équipe a publié un article montrant que la masse du trou noir, déterminée avec une précision cent fois meilleure qu'avant, est de 300 millions de masses solaires, voisine des mesures antérieures (Collaboration *Gravity*, *Nature*, 563, p. 657 novembre 2018). *Gravity* valide donc la méthode de « cartographie par réverbération » pour peser les trous noirs supermassifs.

Ce résultat est très important, non parce qu'il change fondamentalement nos connaissances sur les quasars, mais parce qu'il montre qu'une avance technologique permet de valider la méthode précédente. Le quasar 3C273 n'était pas le meilleur objet pour effectuer la comparaison ; il a été choisi seulement parce que c'était l'une des premières cibles pour tester les performances de *Gravity*. On peut d'ores et déjà prévoir que *Gravity* va pouvoir observer prochainement de la même façon une dizaine d'autres quasars, permettant de déterminer leurs masses avec précision et de valider celles déterminées par la méthode précédente de façon approximative.

Figure 1 : Image optique du quasar 3C 273 obtenue avec le télescope spatial Hubble. On distingue nettement le jet de matière provenant des régions centrales de la galaxie où se cache le trou noir supermassif. Crédit *Nasa*.



Figure 2 : Cartographie de la vitesse des nuages dans le disque de gaz entourant le trou noir supermassif de 3C273. Les points rouges correspondent à des nuages s'éloignant de l'observateur, les bleus à des nuages se dirigeant vers l'observateur. La distribution des points dans la figure montre que les nuages se déplacent dans un plan perpendiculaire à la direction du jet. Crédit collaboration *Gravity*.

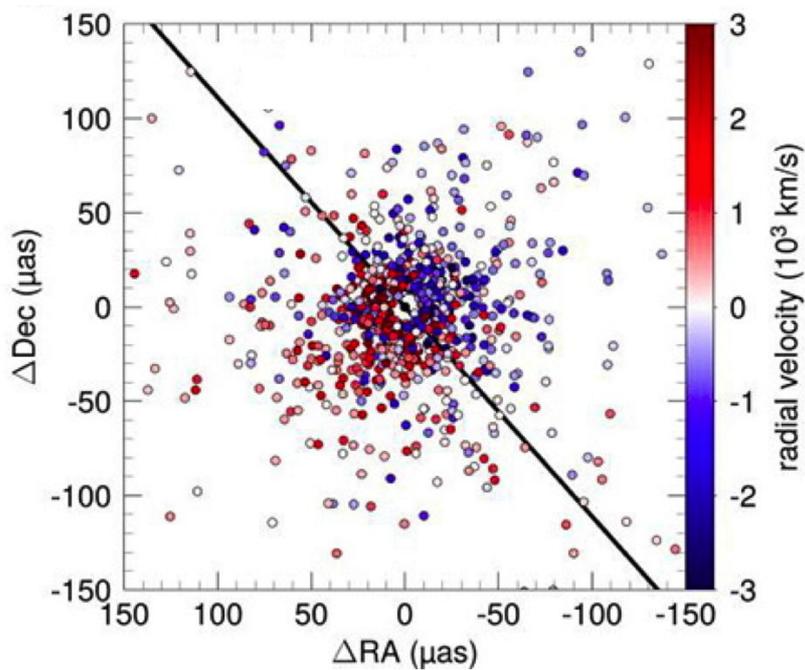
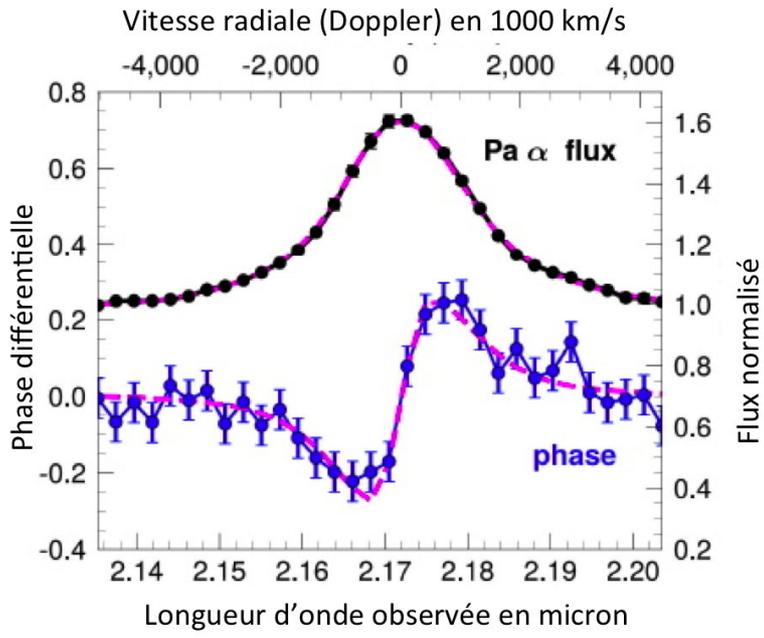


Figure 3 : Profil de la raie Paschen alpha de 3C273 observé par *Gravity*, montrant la forme en S caractéristique d'un mouvement de rotation. Crédit collaboration *Gravity*.



Encore quatre nouvelles sources d'ondes gravitationnelles !

Les collaborations *Ligo* et *Virgo* viennent de publier un catalogue des sources d'ondes gravitationnelles découvertes au cours de leurs deux campagnes d'observation. Quatre nouvelles fusions de trous noirs ont été détectées, dont une qui bat des records de distance et de masse. Les détections devraient se multiplier, grâce à l'amélioration de la sensibilité des détecteurs, lors de la troisième campagne de mesures qui devrait débiter à partir d'avril 2019. Notons qu'un grand nombre d'observations permet, entre autres, d'accroître la précision des tests de la relativité générale. Un article de la collaboration *Ligo-Virgo* sur ce sujet est accessible ([arXiv:1811.12907v1](https://arxiv.org/abs/1811.12907v1)).

Figure waves.jpg : Densité de probabilités pour les masses des deux étoiles avant la fusion, à gauche, et pour la masse et la rotation (sans dimension) après la fusion, à droite. Crédit collaboration *Ligo-Virgo*, [arXiv:1811.12907v1](https://arxiv.org/abs/1811.12907v1).