

Séance du 12 avril 2021

Les trous noirs supermassifs

Françoise COMBES

Professeure au Collège de France
Astrophysicienne à l'Observatoire de Paris

MOTS CLÉS

Trou noir, galaxie, ombre, noyaux actifs, quasars, ondes gravitationnelles, relativité générale, jet radio, superluminique, horizon, spin.

RÉSUMÉ

La première image de l'ombre d'un trou noir a pu être révélée en 2019 grâce à la collaboration de plusieurs antennes radio sur la planète. Couramment depuis 2015, les échos de la fusion de trous noirs nous parviennent en ondes gravitationnelles. Ces objets mystérieux nous réservent encore des surprises.

La majorité des galaxies hébergent en leur centre un trou noir super-massif d'une masse comprise entre un million et quelques milliards de masses solaires. La masse du trou noir est proportionnelle à la masse du bulbe de la galaxie, suggérant une relation étroite entre la formation d'étoiles et la croissance du trou noir.

La matière en tombant dans le trou noir libère une énergie considérable, et le noyau de la galaxie devient actif, c'est un quasar. Pourtant le trou noir ne peut pas avaler plus qu'une certaine limite. Nous verrons comment les trous noirs super-massifs, en rejetant leur nourriture, contrôlent ainsi le taux de formation des étoiles dans les galaxies.

Nota : À cause du confinement sanitaire dû à la Covid 19, cette présentation a été faite en visio-conférence.

Les progrès ont été stupéfiants ces dernières années : image de l'ombre d'un trou noir enfin réalisée, fusions de deux trous noirs révélées en détails par les ondes gravitationnelles, manifestations de l'énorme quantité d'énergie et de gaz éjecté par les noyaux actifs. Ces mystérieux objets très compacts que sont les trous noirs ont reçu beaucoup de lumière, et sont devenus des réalités bien tangibles. Il reste encore beaucoup à découvrir à leur sujet.

Un peu d'histoire

Le concept de trou noir existait déjà au XVIII^e siècle, dans le cadre de la gravité de Newton, découverte un siècle auparavant. John Michell en 1784, puis Pierre-Simon de Laplace en 1795 avaient prédit l'existence de corps assez compacts pour que même la lumière ne puisse s'en échapper. La vitesse d'échappement dans la théorie classique pour un objet ponctuel de masse M peut se calculer facilement en égalant énergie potentielle GM/R , et énergie cinétique $\frac{1}{2} V^2$ par unité de masse. Ici G est la constante de gravitation,

V la vitesse de la particule test, qui se trouve à une distance R de la masse M . Le carré de la vitesse d'échappement égale donc $2GM/R$. Pour un objet assez massif et compact, pour qu'il existe un rayon extérieur à l'objet tel que la vitesse d'échappement soit égale à la vitesse de la lumière c , la relation s'écrit $R = 2GM/c^2$, et définit ce que l'on appelle aujourd'hui l'horizon du trou noir. Tout objet et même un photon qui s'aventure à une distance plus proche du trou noir que l'horizon ne peut plus en sortir. L'horizon définit ainsi le point de non-retour. La vitesse de la lumière était connue depuis les travaux du danois Ole Römer, en 1676 à l'Observatoire de Paris : en suivant dans le temps les éclipses des satellites de Jupiter, il a calculé une vitesse seulement 26% inférieure à la vitesse connue aujourd'hui !

Bien sûr, il fallut attendre la découverte par Einstein en 1915 de la Relativité Générale (RG) pour établir que la gravité n'est pas une force comme les autres, mais une déformation de l'espace, et que toute trajectoire de particule tend à suivre les géodésiques de cet espace courbé (cf Fig. 1). Et ceci concerne toutes les particules, y compris celles qui n'ont pas de masse, comme les grains de lumière ou photons, ce qui n'existait pas dans la gravité de Newton. Dès 1916, Karl Schwarzschild trouve la première solution aux équations d'Einstein de la RG, qui relie la quantité de matière et d'énergie à la courbure de l'espace-temps. Il démontre qu'il apparaît un rayon singulier autour d'une masse concentrée en un point, c'est l'horizon du trou noir, qui est donc appelé rayon de Schwarzschild ; $R_s = 2GM/c^2$.

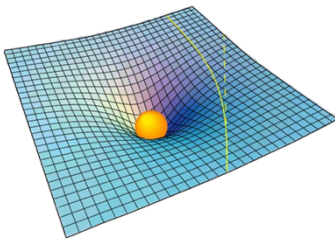


Figure 1 : La masse de l'étoile ici en jaune, déforme et courbe l'espace par sa gravité. Pour simplifier, l'espace est représenté uniquement à 2 dimensions, comme un tapis déformable. Il faut généraliser à 3 dimensions. La trajectoire d'une particule test (ou d'un photon) n'est plus celle en pointillé, en l'absence de l'étoile, mais en trait plein jaune, déviée par la présence de l'étoile.

À cette époque, les trous noirs sont encore une hypothèse, une spéculation à laquelle peu d'astronomes attachent de crédit. Les physiciens, dont Einstein lui-même, ne pensaient pas que les trous noirs puissent exister : une singularité en un point où la densité de masse est infinie était absurde. Pourtant, dans leur article de 1939, Robert Oppenheimer et Hartland Snyder étudient l'effondrement d'une étoile en fin de vie, lorsqu'elle a épuisé son combustible nucléaire. Comme les équations de RG sont très complexes, ils simplifient le problème, en supposant la symétrie sphérique, et négligeant la rotation. Ils concluent qu'au-delà d'un cœur de 1 à 3 masses solaires, tout équilibre est impossible et le résidu de l'étoile doit s'effondrer en un seul point de densité infinie (donc créant une singularité de l'espace). De plus ils montrent que pour un observateur lié à l'étoile, l'effondrement dure peu de temps, de l'ordre d'un jour, même si pour un observateur extérieur, l'étoile semble se stabiliser à son rayon de Schwarzschild, et sa lumière devenir de plus en plus rouge et faible. Pendant encore des dizaines d'années, cette solution mathématique a toujours été refusée par les astronomes et physiciens, qui pensaient qu'une masse suffisante de matière, à cause de sa rotation ou de son asymétrie, pourrait s'échapper et que le résidu ne dépasserait pas alors la limite de 3 masses solaires. Au début des années 1960, la découverte des quasars (astres ponctuels extrêmement lumineux, qui seront décrits plus loin) ébranle ces opinions. Seule l'énergie gravitationnelle formidable déployée au voisinage des trous noirs peut rendre compte de ces objets. En 1963, le mathématicien néo-zélandais Roy Kerr découvre une solution mathématique aux équations de la RG pour une masse ponctuelle en rotation. Cette

solution exacte a ouvert tout un champ de recherche sur les trous noirs, dont les observations montrent qu'ils sont presque tous en rotation significative.

L'étape qui a finalement convaincu les astronomes que les trous noirs n'étaient pas qu'une bizarrerie mathématique, correspond aux travaux de Roger Penrose, en 1965. Ces travaux lui ont apporté à moitié du prix Nobel de physique en 2020. Penrose se sert de solutions topologiques, et de raisonnement sur les surfaces piégées pour prouver que les trous noirs doivent effectivement se former, par effondrement d'étoiles massives en fin de vie. Les trous noirs sont une conséquence inéluctable de la relativité générale d'Einstein. Roger Penrose montre qu'en relativité générale, même la pression des photons est équivalente à l'effet de la masse : il n'est plus possible de préserver l'équilibre en accroissant la pression, qui ne fait qu'accroître l'effondrement. Roger Penrose montre aussi comment les éventuelles asymétries de la matière en effondrement sont éliminées par rayonnement d'ondes gravitationnelles, si bien qu'il ne reste plus que la masse et la rotation pour caractériser le trou noir. Le théorème de Penrose démontre qu'au-delà de la limite de masse, le résidu d'une étoile doit s'effondrer en trou noir, et qu'un horizon des événements (rayon d'où plus rien ne peut sortir, même la lumière) doit inévitablement se former.

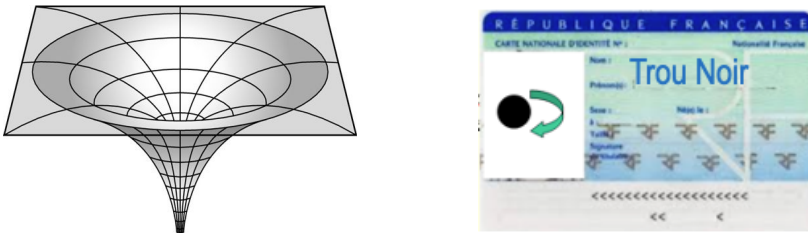


Figure 2 : Représentation à 2 dimensions de l'espace autour d'un trou noir : il n'y a plus seulement déformation de la surface, mais carrément un trou dans le tapis. Sur la carte d'identité du trou noir, seuls signes distinctifs, sa masse et son spin.

Une fois la masse concentrée en un point, il n'y a plus beaucoup de paramètres pour caractériser un trou noir (cf Fig. 2). On dit qu'un trou noir n'a pas de cheveux, selon le théorème de calvitie de Werner Israel. Bien sûr la caractéristique principale du trou est sa masse, qui détermine le rayon de son horizon, proportionnel à sa masse. Pour une masse solaire, ce rayon est de 3km. Le trou noir pourrait éventuellement avoir une charge électrique, mais en astronomie, cela ne se rencontre pas, car des particules chargées dans les environs vont être attirées et annuler cette charge. Par contre, le moment cinétique de rotation est le second paramètre important qui caractérise le trou noir. Celui-ci provient du moment cinétique de la matière avalée par le trou noir pour croître, et nous renseigne sur son histoire. Par un effet relativiste, appelé effet de Lense-Thirring, le trou noir en rotation entraîne l'espace autour de lui dans sa rotation, et toute matière dans les environs va finalement être forcée de s'aligner.

Comment faire l'image d'un trou noir ?

Aucune lumière ne peut sortir du trou noir, il ne rayonne pas. Mais lorsque le trou noir est alimenté en gaz, celui-ci forme un disque d'accrétion, en orbite autour du trou noir, le temps qu'il échange son moment cinétique, et qu'il dissipe une grande partie de son énergie, avant d'être avalé par le trou. Il existe une dernière orbite stable, qui se trouve à 3 fois le rayon de Schwarzschild R_s , pour un trou noir sans rotation. Un trou

noir en rotation, qui entraîne l'espace autour de lui, permet à la matière tournant dans le même sens de s'approcher plus près, jusqu'à un rayon $R_s/2$, pour le plus grand spin possible. Par contre, si la matière est en rotation inverse, alors au contraire, la dernière orbite stable est à $4.5 R_s$. Pour les particules sans masse comme les photons, il existe une orbite circulaire possible (quoique instable), à $1.5 R_s$, qui pourrait être à l'origine d'un fin anneau ou sphère de lumière. Mais la grande majorité des photons jusqu'à $2.5 R_s$ est absorbée par le trou noir, ce qui crée une ombre à l'intérieur de la lumière du disque d'accrétion.

Cette image a pu être faite pour le trou noir supermassif de la galaxie Messier 87, au centre de l'amas de la Vierge. Cette galaxie elliptique géante possède un trou noir de 6 milliards de masses solaires, et son noyau est actif, notamment par son jet radio (cf Fig 3). La collaboration « Event Horizon Telescope » utilise des télescopes en ondes millimétriques à tous les coins de la planète, afin de détecter les signaux par interférométrie, et ainsi de disposer d'une ligne de base équivalente au diamètre de la Terre de 12 000 km. La résolution spatiale ainsi obtenue à 1 mm de longueur d'onde est de 40 micro-secondes d'arc. C'est la première fois qu'une telle résolution a pu être atteinte, ce qui a permis de faire la première image de l'ombre d'un trou noir, publiée en 2019. L'interférométrie de longue base en ondes centimétriques est faite depuis des dizaines d'années, car l'atmosphère ne pose pas de problème. En ondes millimétriques, l'humidité et la turbulence de l'atmosphère représentent des défis sérieux à relever, pour garder la cohérence de phase entre les divers signaux.

L'image du trou noir de la Figure 3 correspond en orange à l'émission synchrotron du gaz ionisé du disque d'accrétion, qui tourne autour du trou noir avec une vitesse comparable à la vitesse de la lumière. La polarisation du signal a montré qu'il existait un fort champ magnétique, à l'origine de l'éjection des particules dans le jet.

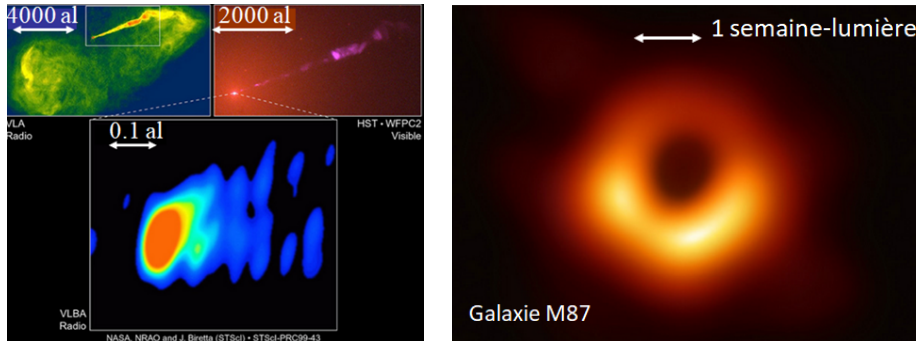


Figure 3 : La galaxie M87 et son jet radio à plusieurs échelles. À gauche, l'émission du jet imagé par le VLA (Very Large Array, USA) en ondes centimétriques (barre de 4000 années-lumière). Le carré blanc est agrandi ensuite (barre 2000 al) à droite, avec l'image optique du jet faite par le télescope spatial Hubble (HST). Le noyau est ensuite agrandi en bas (barre de 0.1 al) avec l'image radio centimétrique, effectuée avec le VLBA (Very Large Baseline Array, USA). L'image à droite de l'ombre du trou noir a été obtenue par l'EHT (Event Horizon Telescope), et la barre indique cette fois 1 semaine-lumière, ou 80 micro-secondes d'arc.

Deux sortes de trous noirs

Deux sortes de trous noirs sont très fréquemment observés en astronomie. La première catégorie est celle des trous noirs de masse stellaire. Ils sont le résultat de l'explosion en fin de vie d'une étoile massive en supernova. Certaines explosions, après

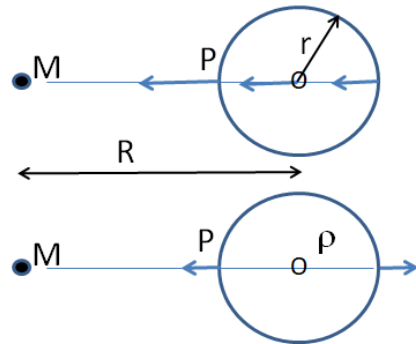
expulsion de l'enveloppe de l'étoile, résultent en un résidu de masse inférieure à 3 masses solaires, et peuvent trouver un équilibre en tant qu'étoiles à neutrons. C'est le cas de la nébuleuse du Crabe, dont l'explosion a été observée par les astronomes chinois en l'an 1054. Dans une étoile à neutrons, la densité moyenne est de 100 000 milliards de g/cm^3 , et la gravité est compensée par la pression de dégénérescence prédite par la mécanique quantique. Par contre au-delà de 3 masses solaires, le résidu ne trouve plus d'équilibre, et explose en trou noir. Lorsque l'explosion a lieu au sein d'une étoile binaire, et que l'étoile compagnon n'est pas éjectée, cette dernière continue d'orbiter autour du trou noir. Une partie de son enveloppe peut être attirée par le trou noir et former un disque d'accrétion, émetteur de rayons X et de lumière UV. Ce sont les binaires X, fréquemment observées dans notre Galaxie et les galaxies voisines. Certainement des centaines de millions de trous noirs de masse stellaire tournent dans le disque de notre Galaxie.

La deuxième catégorie sont les trous noirs supermassifs, d'un million à plusieurs milliards de masses solaires. Ces trous noirs existent dans le noyau de la plupart des galaxies, ils se sont formés et ont accru leur masse en symbiose avec la formation de leur galaxie hôte. Le rayon de l'horizon d'un trou noir d'un milliard de masses solaires est de 2 heures-lumière. Comme le rayon de l'horizon est proportionnel à la masse M , la densité moyenne à l'intérieur de l'horizon décroît comme $1/M^2$. Les trous noirs supermassifs ont une densité très faible, contrairement aux trous noirs de masse stellaire. À partir de $10^8 M_{\odot}$, la densité moyenne devient égale à celle de l'eau, qui est aussi la densité moyenne à l'intérieur des étoiles. Les forces de marée au passage de l'horizon ne pourront plus les détruire, et apporter du gaz au disque d'accrétion, elles seront avalées entières. Les forces de marée d'un trou noir ou d'une masse ponctuelle ne parviennent en effet à vaincre l'auto-gravité et la cohésion d'un corps étendu qu'en dessous d'une distance limite où la densité moyenne égale la densité du corps (cf Encadré).

ENCADRÉ : Forces de marée

Un corps étendu, comme une étoile ou un nuage de gaz de masse m , orbitant autour d'une masse ponctuelle M , subit des forces de marée, qui sont dues à l'inhomogénéité du champ gravitationnel d'un point à l'autre de son volume. Pour connaître la limite au-delà de laquelle l'auto-gravité du corps ne suffira plus à maintenir son intégrité, et il sera détruit par les forces de marée, calculons les forces de marée subies à une distance R de la masse ponctuelle. Le corps étendu pour simplifier est une sphère homogène de densité ρ , et de rayon r , comme l'indique la figure E1

Figure E1 : L'étoile de rayon r et de densité ρ est en orbite autour du trou noir de masse M , à une distance $R \gg r$. Les flèches bleues en haut représentent les forces de gravité exercées par M au centre O et aux points extrêmes. Dans le référentiel de l'étoile, en rotation autour de M , le centre de gravité O est fixe, et tous les points sont aussi soumis à la force d'inertie du repère qui annule la force en O . Restent alors les forces de marée (schéma du bas), qui sont les différentielles de la force de gravité sur le volume de l'étoile.



La force de marée, différentielle de la force de gravité, peut être estimée au point P comme GMr/R^3 , par unité de masse. La force d'auto-gravité de l'étoile est Gm/r^2 . L'égalité de ces deux forces survient lorsque $M/R^3 = m/r^3$, soit la densité de l'étoile r devient du même ordre que la densité moyenne du trou noir à la distance R .

Cette approximation de marée est voisine de la limite de Roche, calculée pour les planètes par l'astronome Edouard Roche, qui a fait toute sa carrière à l'Université de Montpellier au XIX^e siècle.

Spaghettis et lentille gravitationnelle

Lorsqu'une étoile est détruite par effet de marée, elle est réduite en nuage de gaz, vite capturé dans le disque d'accrétion du trou noir. Le gaz de l'étoile est d'abord étiré comme un spaghetti, et s'enroule plusieurs fois autour du trou noir.

Au voisinage du trou noir, l'espace est très déformé et courbé. Le trou noir agit comme une lentille gravitationnelle en déviant les rayons lumineux. L'aspect du disque d'accrétion peut apparaître pour un observateur éloigné très complexe. Les rayons émis par l'arrière du disque sont déviés vers l'avant par le haut et par le bas, il est possible de voir toutes les parties du disque, comme le montre la Figure 4. Même pour un disque qui serait moins incliné dans le plan du ciel, l'image est très déformée, comme celle du disque de M87 (fig 3).

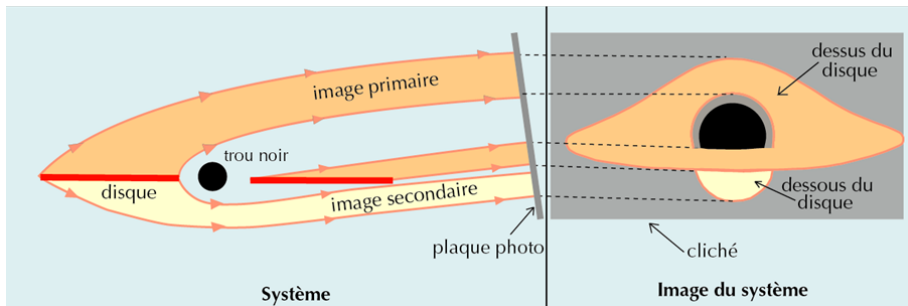


Figure 4 : Vue schématique du disque d'accrétion autour d'un trou noir, vu par la tranche, avec les rayons lumineux émis vers l'observateur, après déviation par le champ de gravité. L'image résultante est représentée à droite, avec autour de l'ombre du trou noir, l'arrière du disque vu par-dessous et par-dessus. D'après un dessin de Jean-Pierre Luminet.

Le trou noir de notre Galaxie : SgrA*

Le trou noir supermassif le plus proche de nous, est celui du centre Galactique, à 27 000 années-lumière du Soleil. Il se trouve dans la constellation du Sagittaire, coïncidant avec la source radio SgrA. Notre galaxie n'est pas un noyau actif, mais il y a tout de même une radio source autour du trou noir, de même une source de rayonnements infrarouge et X variables, correspondant à un faible disque d'accrétion. Le trou noir central se nourrit faiblement.

Pour l'observer, il faut utiliser le domaine de l'infrarouge proche (2 micron de longueur d'onde), car dans le domaine visible, le centre de la Galaxie nous est caché par la poussière. D'autre part, pour s'affranchir de la turbulence de l'atmosphère, qui étale la lumière de toute source ponctuelle, comme les étoiles, en une tache de l'ordre d'une seconde d'arc, il faut utiliser les outils d'optique adaptative, qui corrigent des

déformations du front d'onde sur des échelles de temps de la micro seconde grâce à une étoile dans le champ, ou une étoile laser. Il est alors possible d'atteindre la résolution de la taille de diffraction des télescopes, de l'ordre de 40 millisecondes d'arc. Les étoiles qui orbitent très près du centre galactique peuvent alors être suivies dans le temps, car leurs mouvements propres sont importants, correspondant à des vitesses de plus de 1 000 km/s. Deux groupes ont effectué ce suivi pendant plus d'une vingtaine d'années, l'un européen, mené par Reinhard Genzel sur le VLT de l'ESO, l'autre américain en Californie, mené par André Ghez, sur les télescopes Keck à Hawaii. Ces deux chercheurs se sont partagés l'autre moitié du prix Nobel de physique 2020 (la première moitié étant pour Roger Penrose). Les deux équipes ont mis en évidence les orbites d'un grand nombre d'étoiles tournant près du centre galactique, permettant de mesurer la masse du trou noir, 4 millions de masses solaires (cf Figure 5).

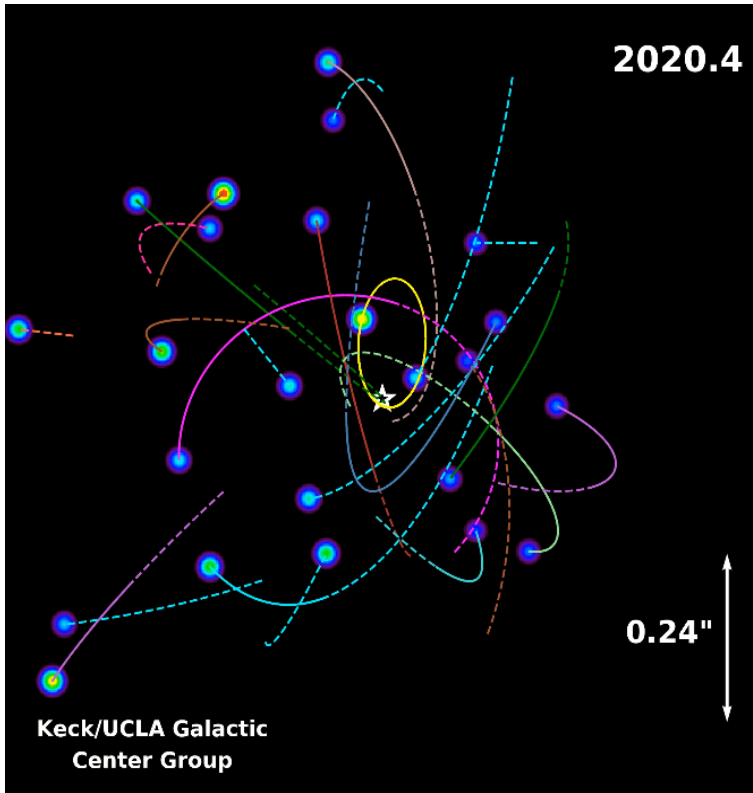


Figure 5 : Orbites de quelques-unes des étoiles suivies depuis plus de 20 ans vers le centre de la Galaxie, par les groupes européen et américain. La barre verticale indique $0.24'' = 10$ jours-lumière. D'après Andréa Ghez et collaborateurs.

Les orbites des étoiles sont des ellipses de Kepler, avec le trou noir comme foyer. Une des plus proches est l'étoile S2, en jaune sur la Figure 5. La période de son orbite est de 16 ans. En 2018, l'équipe européenne utilisant l'interférométrie entre les divers télescopes du VLT de l'ESO, avec l'instrument GRAVITY a obtenu des résultats majeurs sur le passage au péricentre (point de l'orbite le plus près du trou noir SgrA*) de cette étoile S2. Sa vitesse a atteint 7650 km/s soit 2,5 pour 100 de la vitesse de la

lumière, à l'approche du péricentre en mai 2018, à environ 16 heures-lumière ou 1400 fois le rayon de l'horizon du trou noir. Le décalage spectral vers le rouge, observé dans ce champ gravitationnel intense, est conforme à ce qui est prédit par la relativité générale. La collaboration GRAVITY a aussi suivi un sursaut d'émission proche-infrarouge, produite par le gaz ionisé en orbite autour du trou noir, très près de la dernière orbite stable. Le gaz détecté tourne à une vitesse du tiers de la vitesse de la lumière avec une période d'environ 45 minutes. L'orbite du gaz ionisé est vue presque de face, entre six à dix fois le rayon de l'horizon du trou noir.

Pourquoi pas l'image de l'ombre de notre trou noir ?

Si l'interférométrie dans l'infrarouge donne des informations précieuses sur le disque d'accrétion, il n'est pas possible de faire d'images, à cause de la faible cohérence de phase. Mais l'interférométrie à longue base en radioastronomie millimétrique peut faire des images, comme celle de la Figure 3. La collaboration EHT s'y est efforcée d'ailleurs, même avant d'observer M87. Il existe une coïncidence de taille angulaire entre les deux trous noirs : celui de M87 est 2000 fois plus massif que SgrA*, et il est aussi 2000 fois plus distant. Comme le rayon de l'horizon est proportionnel à la masse, l'horizon de M87* est 2000 fois plus grand que celui de SgrA*, ils sont donc vus sous le même angle de la Terre. La résolution de 20 microsecondes d'arc devrait être suffisante. Pourtant, l'image de l'ombre de SgrA* est bien plus difficile à obtenir, à cause de sa variabilité. La période de rotation dans le disque d'accrétion est aussi proportionnelle à la masse du trou noir, donc 2 000 fois plus petite. S'il est facile d'imager le disque d'accrétion de M87, dont la période est de presque 2 mois, la forte variabilité en un quart d'heure de l'émission du gaz ionisé autour de SgrA* est trop rapide pour pouvoir calibrer et faire interférer les signaux venant de tous les points de la planète. L'expérience sera tentée à nouveau.

Les trous noirs de masse intermédiaire

Comment se forment les trous noirs super-massifs, et où se trouvent les trous noirs de masse intermédiaire entre ceux de masse stellaire et les super-massifs ? Il est certain que les trous noirs au centre des galaxies croissent en masse par accrétion de matière, que ce soit du gaz interstellaire ou des étoiles qui sont capturées et détruites par interaction de marée au voisinage du noyau. Cette croissance commence lentement, car la quantité de matière que peut avaler un trou noir est proportionnelle à sa masse. Normalement, il faudrait plus d'un milliard d'années pour arriver aux trous noirs les plus massifs, comme celui de Messier 87. Pourtant certains ont été observés au début de l'Univers, seulement 700 millions d'années après le Big-Bang. Sans doute les graines au début étaient plus massives. Il est possible que les premières étoiles aient été plus massives que celles que nous connaissons aujourd'hui. En effet, le gaz primordial n'était pas encore enrichi en éléments lourds, comme carbone, azote, oxygène, qui se forment dans les étoiles. Ces éléments lourds, appelés « métaux », permettent de refroidir le gaz par rayonnement, et ainsi les nuages de gaz peuvent se fragmenter et former des étoiles plus petites. En l'absence de ces métaux, les nuages proto-stellaires ont une température plus chaude, et se stabilisent avec une plus grande pression, pour former des étoiles plus massives.

Une fois en fin de vie, les étoiles massives explosent en supernova, et le cœur restant de l'étoile implose en trou noir, à partir de 3 masses solaires. Il existe une limite

supérieure de masse pour former directement un trou noir. Pour les étoiles extrêmement massives, l'énergie de la supernova est si grande, qu'il peut se former dans le rayonnement des paires particule/antiparticule, qui rendent l'objet instable : une fois les particules formées, il y a une chute de pression. La violente instabilité qui s'ensuit disperse tous les résidus et les débris dans l'espace, et il ne se forme aucun trou noir. Au-delà de $60 M_{\odot}$, les trous noirs ne se forment plus par explosion de supernova, mais sans doute par un autre mécanisme. L'observation en 2019 d'un événement très particulier d'ondes gravitationnelles par l'expérience LIGO/VIRGO (GW190521) a donné la solution : la fusion de deux trous noirs. Cet événement publié en 2020 correspond à la fusion de deux trous noirs de masses 65 et 85 M_{\odot} , qui a résulté en la plus grosse masse finale de 142 M_{\odot} . Cette masse finale débute la catégorie des masses intermédiaires.

La fusion de deux trous noirs est rare, mais la fusion successive de trous noirs, comme illustrée en Figure 6 est très improbable, sauf à l'intérieur des amas globulaires, où la densité d'étoiles est exceptionnellement élevée. Il peut exister 100 000 étoiles dans une taille caractéristique de 3 années-lumière, alors que l'étoile la plus proche du Soleil est à 4 années-lumière. Il est possible d'expliquer ainsi la formation de trous noirs de masse intermédiaire, qui seraient progressivement amenés vers le noyau des galaxies par la friction dynamique exercée sur les amas globulaires. La friction dynamique est plus efficace sur des grandes masses, comme les amas globulaires ou les trous noirs supermassifs, qui se retrouvent au centre. Par contre sur des objets de 100 M_{\odot} isolés, elle n'est pas efficace, et les trous noirs de cette masse pourraient passer inaperçus dans une galaxie.

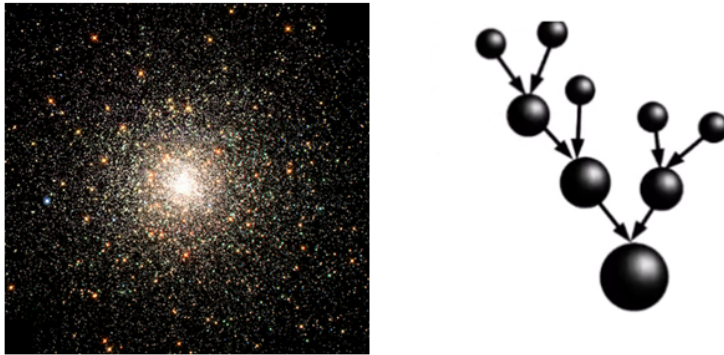


Figure 6 : Exemple d'amas globulaire : Messier 80, à gauche. La fusion successive de trous noirs est illustrée à droite.

Les quasars

Paradoxalement, les trous noirs supermassifs peuvent être les astres les plus lumineux de l'Univers. Ces trous noirs restent tapis au centre des galaxies, et lorsqu'ils capturent de la matière environnante, ils deviennent très actifs : ce sont des quasars, pour « quasi star », nom attribué quand on ignorait encore leur nature exacte.

Ces objets ont d'abord été détectés en radio-astronomie. Après la seconde guerre mondiale, grâce à tous les radiotélescopes fabriqués à partir des radars militaires, de nombreuses sources radio ont été remarquées dans le ciel, et des catalogues entiers de centaines de sources ont été établis. Mais leur émission est continue en fréquence, et ne comporte pas de raie spectrale. Il n'était pas possible de déduire leur distance, avec l'aide

de l'expansion de l'Univers et de la loi de Hubble-Lemaître, qui relie la distance au décalage vers le rouge du spectre.

Les astronomes ont alors recherché des contreparties optiques de ces sources radios, afin de pouvoir faire un spectre, et en déduire leur distance. En pointant un télescope optique sur la position de la source radio, les astronomes ont vu une quasi-étoile, dont le spectre optique ne ressemblait à rien de connu, ils n'y retrouvaient pas les raies vues par exemple dans le spectre du Soleil. Sans même connaître leur distance, il était clair que ces astres étaient très compacts et quasi ponctuels, donnant lieu à scintillation à travers l'atmosphère.

En 1963, l'astronome néerlandais Maarten Schmidt eut l'idée suivante : ce spectre très étrange, s'il est décalé vers le rouge d'un facteur considérable – ce qui à l'époque était difficilement pensable – alors il est possible d'y retrouver les raies habituelles. Ce qui signifiait que l'objet était peut-être tout simplement extrêmement lointain. Un quasar est donc un objet extrêmement brillant, certains d'entre eux peuvent être 1 000 fois plus lumineux que l'ensemble de la galaxie réunie autour d'eux. C'est la raison pour laquelle ils apparaissent comme des « quasi-star » isolées, sans rien autour. Pourtant ce sont toujours des noyaux de galaxies qui émettent cette luminosité faramineuse. Ils sont tellement lumineux qu'ils effacent leur galaxie-hôte, l'œil de l'observateur est ébloui.



Figure 7 : Jet radio éjecté par le noyau de la radio galaxie 3C348, ou Herculis A. Le noyau actif est situé au centre de la galaxie elliptique, dont la photo optique est visible au centre du jet. L'image radio (fausse couleur rose, crédit VLA/NRAO) est superposée sur une image visible du télescope spatial Hubble (HST, crédit : NASA, ESA). La galaxie est située à 2 milliards d'années-lumière dans l'amas d'Hercule.

Une fois cela compris, il a été possible de détecter un grand nombre de tels objets, et plusieurs millions de quasars sont connus aujourd'hui. Mais à l'époque, les catalogues n'en comptaient qu'une centaine. Ces quasars émettent parfois des jets radios, qui ont des contreparties dans toutes les longueurs d'onde, y compris optiques. Dans le rayonnement radio comme dans le rayonnement optique, le jet de matière est parfois

fragmenté en grumeaux. Les astronomes ont d'abord pensé qu'il s'agissait d'un défaut de la plaque photo. Mais à plus haute résolution spatiale, cela s'est confirmé. Environ 10% des quasars ont des jets radio. Ils peuvent être de toutes tailles, les plus grands sortent de leur galaxie (cf Fig 7), et peuvent atteindre 10 millions d'années-lumière. Les jets sont constitués de gaz ionisé, des protons et électrons, qui se déplacent à vitesse relativiste. Au départ, leur énergie est telle que l'on peut voir surtout le jet qui vient vers nous, par effet Doppler relativiste, au détriment de celui qui s'éloigne, affaibli. Le jet est collimaté par le champ magnétique intense, amplifié par la grande rotation dans le disque d'accrétion, dont une partie est emportée par le jet. L'émission du jet est due au mécanisme synchrotron, de particules relativistes tournant dans un champ magnétique. Après une longue distance, les particules perdent de l'énergie dans le jet, et terminent leur course dans des lobes radio (cf Fig 7). Le lancement du jet à partir du disque d'accrétion est un phénomène magnétique, qui prend son énergie dans la rotation du trou noir. L'énergie de rotation peut constituer jusqu'à 25% de l'énergie du trou noir, et le mécanisme de Penrose, où une partie de la matière est accrétée avec un moment cinétique opposé au spin du trou noir, peut ainsi en retirer une grande partie.

Jets radio superlumériques

Une surprise attendait les radio-astronomes, lorsqu'ils ont suivi pendant quelques années les jets radio, et leur variabilité. Il est fréquent que le jet se subdivise en plusieurs pics d'émission, plusieurs bouffées de gaz éjectées à des périodes différentes. L'éjection n'est pas homogène et continue. Avec beaucoup de résolution spatiale, obtenue par interférométrie, il est possible de suivre dans le temps le mouvement des pics d'émission, comme le montre la figure 8.

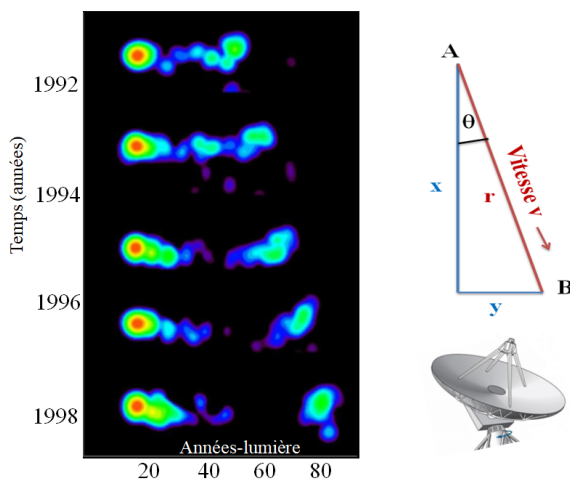


Figure 8 : À gauche est représenté le jet radio dans 3C279 (crédit VLA, NRAO). En 6 ans, les deux pics d'émission du jet (A et B) se sont éloignés d'environ 60 années-lumière, comme si leur vitesse relative était de $10c$. À droite, le schéma montre comment B s'éloigne de A à la vitesse relative v , en un temps $t=r/v$. L'observateur en bas, voit le signal arrivant de B (plus proche de lui) en avance par rapport au signal arrivant de A, qui a un retard égal à x/c . Le temps apparent pour que l'objet aille de A vers B, à la vitesse $v=\beta c$ est donc $t_{app} = t - x/c = (r/v) - (r/c) \cos \theta$, soit $t_{app} = (r/v) (1 - \beta \cos \theta)$. La vitesse apparente est alors $v_{app} = y/t_{app} = (v \sin \theta)/(1 - \beta \cos \theta)$. Pour $\beta \sim 1$, et $\cos(\theta) \sim 1$, v_{app} peut dépasser de beaucoup la vitesse de la lumière.

La vitesse apparente du jet est alors bien plus grande que la vitesse de la lumière ! Ces jets sont appelés « superluminiques ». Bien sûr c'est une illusion, le jet ne se déplace effectivement qu'à une vitesse proche, mais inférieure à c . La figure 8 expose le principe, qui vient du fait que les pics d'émission plus proches de l'observateur ont moins de distance à parcourir pour envoyer leur signal, qui ainsi paraît arriver plus vite. Il faut donc prendre en compte le retard pris par la lumière, car les jets vont à une vitesse comparable à c . Le phénomène survient pour des jets qui s'approchent vers l'observateur avec un petit angle par rapport à la ligne de visée. Dans ces conditions, l'émission est amplifiée par effet Doppler relativiste, et le jet nous apparaît beaucoup plus lumineux. Dans les débuts de la radio-astronomie, les premières sources étaient toutes dans ce cas-là, super-luminiques, car c'étaient les plus brillantes du ciel.

Les jets radio sont peu massifs, et peuvent facilement être perturbés par leur environnement. Lorsque la galaxie-hôte est en mouvement dans un amas de galaxies, elle rencontre le gaz très chaud (millions de degrés) qui baigne tout l'amas, et émet des rayons-X thermiques. Le mouvement relatif crée comme un vent qui balaye les jets. Il est assez fréquent de voir les jets se courber dans le vent, et même se plier complètement comme un parapluie ! Les galaxies se déplacent dans les amas avec des vitesses de l'ordre de 1000km/s.

Limite d'Eddington

Les quasars sont les objets les plus lumineux de l'Univers, grâce à l'énergie gravitationnelle libérée par la matière qui tombe dans le trou noir central. Calculons l'ordre de grandeur de cette énergie : pour une masse m venant de l'infini, l'énergie potentielle au niveau de l'horizon du trou noir de mass M , est de GmM/R_s , avec $R_s=2GM/c^2$. L'énergie disponible est donc de $\frac{1}{2} mc^2$, la moitié de l'énergie de masse. L'observation montre que l'efficacité de transformation de cette énergie en rayonnement est telle que l'observateur voit 10% de mc^2 . C'est bien plus que l'énergie libérée dans les étoiles, par les réactions nucléaires de fusion, qui résultent en moins de 1% de l'énergie de masse. En consommant 1 à 10 masses solaires par an, un trou noir peut rayonner 1000 fois plus que les 200 milliards d'étoiles contenues dans une galaxie comme la Voie lactée. Mais combien de matière peut avaler le trou noir, et existe-t-il une limite à sa glotonnerie ?

Lorsque le flux de matière avalé est trop important, l'énergie déployée en rayonnement est telle que la pression de radiation sur le gaz ionisé compense la gravité. Le gaz ne peut plus tomber sur le trou noir, au contraire il est repoussé, en un vent galactique, qui peut sortir de la galaxie. Cette limite correspond à la luminosité maximale d'Eddington, qui est proportionnelle à la masse du trou noir, et égale à 3×10^{38} luminosités solaires pour un trou noir d'un milliard de masses solaires. Un quasar ne pourra pas rayonner plus que cette limite, qui correspond à l'accrétion de 20 masses solaires par an, pour ce trou noir d'un milliard de masses solaires.

Il est possible que cette auto-régulation de la masse du trou noir permette d'expliquer la relation de proportionnalité observée entre masse des trous noirs et masse des bulbes de galaxies. Cette relation est vérifiée pour toutes les galaxies proches, où il est possible de mesurer la masse du trou noir par la cinématique de la matière dans son voisinage (cf Fig 9).

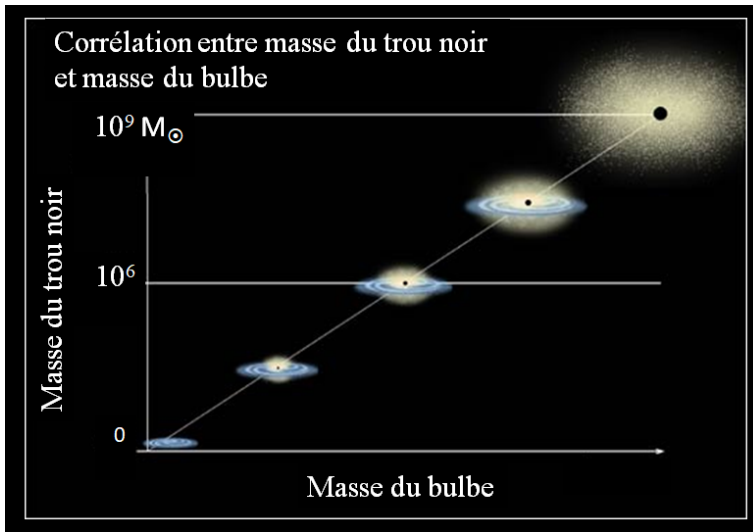


Figure 9 : Relation de proportionnalité entre masse du trou noir et masse du bulbe dans les galaxies proches, où il est possible de mesurer la masse du trou noir. Le bulbe est le composant sphéroïdal jaune, et le disque est représenté en bleu.

Croissance en symbiose, Auto-régulation

Les trous noirs jouent un rôle très important dans la vie des galaxies, ils sont capables de réguler leur croissance, par accréation de matière et formation d'étoiles. Les galaxies sont composées de matière ordinaire (hydrogène essentiellement), constituée de protons et neutrons, particules appelées baryons, mais aussi de matière plus exotique, matière noire invisible, constituée de particules encore inconnues. Cette matière invisible domine le contenu en matière de l'Univers : elle représente 83% de la matière, alors que les baryons n'en représentent que 17%. Avant que ne se forment les premières galaxies, les deux matières sont bien mélangées, et partout la matière baryonique représente 17%. Par contre, dans les galaxies aujourd'hui, les baryons représentent moins de 4%. Plus de 80% de la matière ordinaire a été éjectée des galaxies. Par quel mécanisme ?

Pour les galaxies de petite masse, les galaxies naines de moins de 10% de la masse de la Voie lactée, la formation d'étoiles elle-même, avec les explosions de supernovæ sont capables d'éjecter du gaz en dehors des galaxies. La vitesse d'échappement du gaz peut-être atteinte, car le puits de potentiel gravitationnel est peu profond. Par contre pour les galaxies massives, les explosions de supernovæ ne peuvent éjecter du gaz que dans le halo, et ce gaz va ensuite redescendre dans la galaxie, comme par un effet de fontaine. Le gaz ne s'échappe pas, et il faut trouver un autre mécanisme pour expliquer l'éjection de gaz. C'est là que les noyaux actifs peuvent fournir un mécanisme. Leur gravité est très peu sensible, leur sphère d'influence au centre des galaxies ne dépasse pas un rayon de 70 années-lumière, soit mille fois moins que le rayon de la galaxie. Par contre l'énergie déployée lorsque de la matière est avalée par le trou noir est considérable, et par des vents galactiques ou des jets radio, le noyau actif peut éjecter de la matière ordinaire en dehors des galaxies.

Récemment de nombreuses observations de flots de gaz moléculaire sont venues étayer ce phénomène. Près du noyau actif, au centre des galaxies, des éjections de gaz de l'ordre de 10 à 100 masses solaires par an, avec des vitesses proches ou dépassant la

vitesse d'échappement, sont fréquentes. Les taux d'éjection de gaz sont égaux ou même jusqu'à 10 fois supérieurs au taux de formation d'étoiles, et peuvent donc freiner ou même arrêter la croissance de la galaxie. Ce rôle de régulation est d'autant plus évident dans les amas de galaxies, qui baignent dans un halo de gaz chaud émetteur de rayons-X. Les jets radio et leur flux de particules relativistes creusent des cavités dans le gaz-X, qui peuvent monter par la pression d'Archimède vers les parties externes de l'amas. Ces bulles entraînent du gaz plus froid près des galaxies, qui éventuellement va retomber dans les galaxies pour former des étoiles, mais en partie seulement. Un exemple de ces bulles de gaz fait l'objet de la figure 10, dans l'amas de Persée. Le gaz chaud de l'amas rayonne par collisions et se refroidit, il pourrait tomber sur la galaxie centrale, et alimenter sa formation d'étoiles. À peine le gaz a-t-il commencé à alimenter le trou noir, que celui-ci devient actif, et rejette le gaz au loin, régulant ainsi la croissance de la galaxie. Dans les simulations de formation de galaxies, lorsque l'action du trou noir n'est pas prise en compte, il se forme des galaxies très massives qui ne sont pas observées. La régulation des noyaux actifs est nécessaire pour rendre compte de la masse maximum des galaxies. Si ce phénomène de régulation est efficace tout au long de l'âge de l'Univers, il pourrait expliquer que la plupart de la matière baryonique est en dehors des galaxies aujourd'hui.

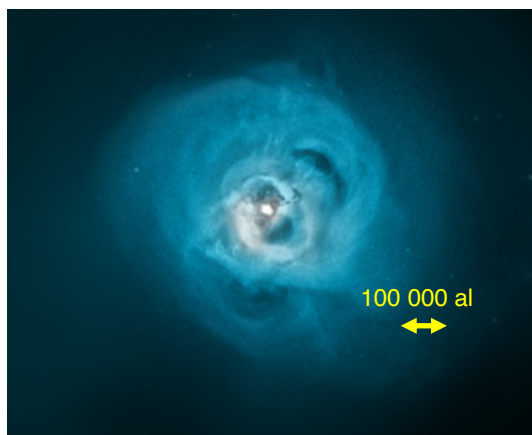


Figure 10 : Image de l'émission thermique de rayons X du gaz chaud baignant l'amas de Persée.

Au centre est la galaxie centrale de l'amas, Perseus A, une radio galaxie émettant un jet relativiste. Celui-ci sculpte des cavités dans le gaz chaud, visibles en plus sombre sur l'image. La zone concernée dans l'amas est bien plus vaste qu'une galaxie (voir l'échelle en années-lumière en jaune). D'après A. Fabian *et al.* (observations du satellite Chandra)

En à peine un demi-siècle, nous avons appris que les trous noirs existent bel et bien, qu'ils sont à l'origine des astres les plus lumineux de l'Univers, les quasars, et que la plupart des galaxies abritent un trou noir super-massif en leur centre. Nous savons maintenant qu'ils jouent un rôle fondamental dans la vie des galaxies, en régulant leur formation d'étoiles.