

Un trou noir massif au centre de la Galaxie

Depuis une dizaine d'années, les astronomes tournent un regard de plus en plus acéré vers le centre ultime de notre Galaxie, soupçonné d'abriter un trou noir extrêmement massif. C'est une technique nouvelle, l'optique adaptative, qui a permis une percée décisive au cours des dernières années. La finesse des images obtenues en infrarouge sur le Very Large Telescope, équipé du système d'optique adaptative NAOS, a rendu possible la détermination des orbites d'étoiles appartenant à un amas très dense autour d'une source radio intense. L'orbite d'une étoile particulière démontre l'existence d'un trou noir – cet objet relativiste jusqu'ici encore du domaine théorique – de 3 à 4 millions de masses solaires. Ce résultat a été conforté par la détection de l'émission infrarouge « calme » et la découverte de sursauts de l'environnement immédiat du trou noir qui témoignent d'une accrétion par vagues et contraignent la rotation du trou noir.

Un trou noir comme moteur des quasars ?

L'idée que le centre de certaines galaxies soit habité par un monstrueux trou noir d'un milliard de fois la masse du soleil (qu'on note M_{\odot}) n'est pas nouvelle. Dans les années 70, quand il s'est avéré que les Quasars (contraction de l'anglais Quasi Stellar Object) étaient des objets extrêmement lointains, compacts et d'une exceptionnelle luminosité, il a fallu trouver un mécanisme capable de convertir de la masse en énergie avec une efficacité que la fusion nucléaire était incapable d'atteindre. Transformer en rayonnement l'énergie gravitationnelle d'une masse qui, de l'infini, atteindrait le rayon d'un trou noir se révélait nettement plus efficace (voir l'encadré 1). Il est nécessaire cependant que la matière en question, étoiles ou gaz, ne tombe pas directement sur le trou noir, mais spirale d'abord en formant ce qu'on appelle un disque d'accrétion, où elle s'effiloche par collisions et forces de marées et s'échauffe par friction pour devenir un plasma relativiste capable d'émettre efficacement un rayonnement en X et en Ultra-Violet. L'accrétion d'une masse de seulement $10 M_{\odot}$ par an suffirait alors à produire la luminosité typique de 10^{40} W observée pour un quasar. Ce modèle possède une grande cohérence, fondée sur des considérations mêlant l'âge des Quasars, leur luminosité et l'observation de variabilité à courte période. On en déduit que la masse de ces hypothétiques trous noirs devrait être de l'ordre du milliard de M_{\odot} , soit une fraction non négligeable de la masse totale d'une galaxie (quelques $10^{11} M_{\odot}$ pour la nôtre). A cause de leur distance, il est difficile d'étudier les galaxies hôtes des quasars. En revanche, il existe tout un bestiaire d'analogues des Quasars, mais en moins violent, les noyaux actifs de galaxie (NAG), qui gîtent dans des galaxies beaucoup plus proches. Avec l'améliora-

tion des instruments, la fin des années 90 a apporté la confirmation que dans toutes les galaxies abritant un NAG, la répartition des vitesses des étoiles, mesurées par effet Doppler, présentait un changement brutal au cœur de la galaxie, témoignant de la présence d'une énorme masse très concentrée. Cette masse pouvait cependant encore être un amas sombre, c'est-à-dire formé de corps de masse stellaire mais peu lumineux comme des naines blanches, des naines brunes (étoiles avortées) ou même de nombreux trous noirs de masse stellaire. Acquérir la conviction que notre propre Galaxie abrite en son centre un trou noir massif aurait ainsi des implications cosmologiques sur la formation des premières galaxies, premières générations d'étoiles et premiers NAG, qui vont bien au delà de la simple connaissance de notre Voie Lactée.

Le centre de notre galaxie

Le voyageur qui se dirigerait d'abord vers la constellation du Sagittaire puis continuerait son périple sur 24000 années-lumière, arriverait dans des régions très différentes de celle de notre Soleil. Il serait sans doute d'abord frappé par la densité des étoiles autour de lui : un million de fois plus grande ; puis il s'émerveillerait au spectacle des écharpes lumineuses de gaz ionisé qui s'enroulent en spirale autour de ce qui lui apparaîtrait comme un amas particulièrement dense d'étoiles brillantes, très bleues parce que très chaudes. Cette densité d'étoiles, il ne la soupçonnait pas quand il levait son regard dans cette direction du ciel, depuis la Terre : un voile opaque de grains de poussière sub-microscopiques lui dissimulait en fait totalement le cœur de la galaxie (pourtant à peine un grain par millier de m^3). En infrarouge cependant, la longueur d'onde devient nettement

Article proposé par :

Daniel Rouan, daniel.rouan@obspm.fr, Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique, CNRS/Observatoire de Paris.

plus grande que la taille des particules de poussière et les ondes électromagnétiques peuvent se propager plus facilement. Le voile devient ainsi plus ténu en infrarouge (il laisse par exemple passer environ 10 % de la lumière à 2200 nm contre un milliardième seulement à 550 nm), pour devenir totalement transparent aux longueurs d'onde radio. C'est d'ailleurs en pointant un radiotélescope vers ces régions où l'on avait localisé le centre géométrique de la Galaxie, que Balick et Brown en 1974 découvrirent une source radio particulièrement intense qu'ils baptisèrent SgrA*, le A signifiant qu'elle était la plus lumineuse dans cette constellation du Sagittaire. Intense en radio, SgrA* se révélera également variable : il s'agit là de deux indices révélateurs d'un Noyau Actif de Galaxie, certes nettement moins lumineux que ceux qui sont trouvés au centre de certaines galaxies, comme les galaxies de Seyfert, mais utilisant peut-être le même mécanisme de base pour produire son énergie : l'accrétion de gaz ou d'étoiles sur un trou noir très massif. Les mesures de de l'émission infrarouge de SgrA* ne donnèrent cependant rien. S'il y avait un trou noir, il ne devait guère être actif quant à l'accrétion de matière. Qu'à cela ne tienne, si ce n'était pas par son émission, pourquoi ne pas partir à la quête de la signature gravitationnelle de cet éventuel objet super massif ? Elle pourrait se manifester par ses effets sur les trajectoires des étoiles environnantes. L'amas d'étoiles très brillantes apparaissait alors comme providentiellement bien placé : à ces distances, seules des étoiles d'un éclat exceptionnel ont une chance d'être observées au-dessus de la mêlée des milliers d'étoiles qui peuplent cette région dans une confusion notable. L'image de la figure 1, prise dans un filtre à 2,16 μm de longueur d'onde, montre un grand nombre de ces étoiles dans un champ d'à peine quelques années-lumière¹ autour de SgrA* : certaines étoiles semblent presque se toucher ; pourtant l'image rend encore très mal compte de cette surpopulation, puisqu'elle ne nous révèle qu'environ le pourcent le plus lumineux des étoiles présentes. Mais même en se restreignant à ces phares, la confusion est trop grande si on se contente d'images données de façon classique par un télescope, fut-il grand comme le VLT européen (8 m de diamètre). Tant que la finesse des images n'atteint pas le dixième de seconde d'arc (0.5 $\mu\text{radians}$), il est impossible de séparer les objets de façon fiable et de suivre leur trajectoire autour d'un supposé trou noir. Or un télescope, même dans un très bon site ne permet pas d'obtenir des images plus fines que 3 $\mu\text{radians}$. Gagner ce facteur 6 sur le piqué des images, c'est ce que l'optique adaptative a su apporter. De l'obstination et un peu de chance ont fait alors le reste.

NAOS, le système d'optique adaptative du VLT

Les ondes lumineuses qui abordent notre planète après un périple de parfois quelques millions d'années rencontrent en premier l'atmosphère terrestre. Accueil plutôt médiocre

1. La distance du soleil à la plus proche étoile « normale » est de 4,3 années-lumière, *i.e.* distance correspondant à peu près la taille du champ de la figure 1.

puisque les cellules turbulentes introduisent une modulation aléatoire de l'indice de l'air et fait subir quelques outrages au front d'onde, limitant en particulier la finesse angulaire des images à environ 0.5 à 2 secondes d'arc (soit 2,5 à 10 $\mu\text{radians}$). C'est au moins 10 fois la taille angulaire que pourrait fournir un grand télescope seulement limité par la diffraction. L'optique adaptative, introduite au début des années 90, devient l'art de réparer ces outrages en temps réel, afin de restituer le pouvoir de résolution théorique. Pour cela, un miroir souple d'une dizaine de cm s'adapte aux bosses et creux de l'onde maltraitée et la décabosse, à raison de 500 fois par seconde. Analyseur de surface d'onde et calculateurs rapides complètent le système (voir encadré 1).

Fortes d'une expérience qui les avait situées en tête au niveau mondial avec la mise au point des premières expériences fonctionnelles d'optique adaptative pour l'astronomie, trois équipes françaises se sont vues confier par l'ESO, en 1997, la réalisation de NAOS, le système devant équiper l'un des quatre télescopes du géant VLT. Installé au sommet du mont Paranal au nord du Chili, c'est l'un des grands équipements de l'Europe scientifique. Une réussite tant sur le plan technique qu'opérationnel, qui produit régulièrement de grandes premières. Il n'est pas immodeste de dire que NAOS est aujourd'hui le système le plus performant au monde : il produit régulièrement des images dont la finesse n'est limitée que par la seule diffraction du télescope, mais surtout il offre une panoplie de possibilités et un fonctionnement routinier absolument uniques. NAOS, deux tonnes d'optique sophistiquée, de mécanique de précision et d'informatique temps réel, récupère à son entrée un foyer per-

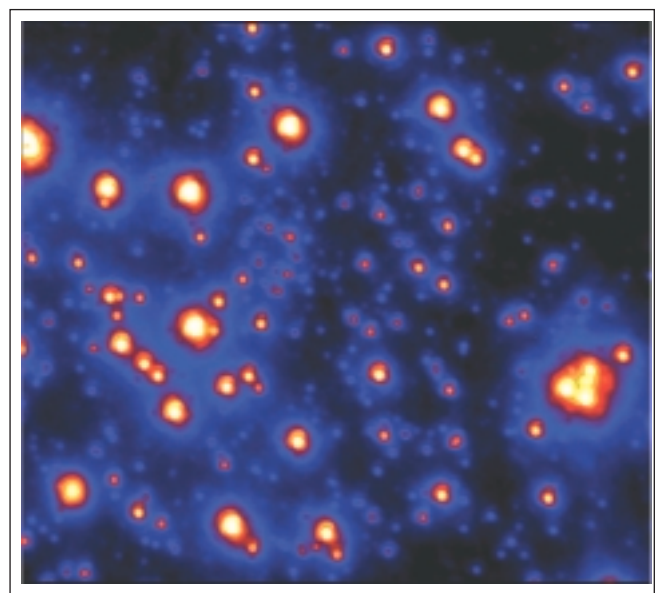


Figure 1 - Image à travers un filtre infrarouge (2,16 μm) de la région contenant la source radio SgrA*. Elle a été obtenue au télescope Yepun du VLT, équipé du système d'optique adaptative NAOS et de la caméra CONICA. On notera que, d'une part, on ne détecte qu'environ 1% des étoiles – les plus lumineuses – et d'autre part que le champ a une dimension de l'ordre de la distance entre deux étoiles dans le voisinage du Soleil. La densité d'étoiles y est donc bien plus élevée (environ un million de fois).

Encadré 1

Optique adaptative en astronomie

Un télescope de diamètre D devrait, nous apprennent les livres d'optique, délivrer un pouvoir séparateur égal à $1.22 \lambda/D$ (critère de Rayleigh), soit $0,1 \mu\text{radians}$ à 800 nm pour un télescope de 8 m de diamètre (ou encore $0,02 \text{ secondes d'arc}$, en utilisant l'unité que préfèrent les astronomes). C'est un niveau de détail extrêmement fin qui permettrait par exemple de repérer un terrain de football sur la Lune. Or les astronomes doivent se contenter dans la réalité d'une résolution effective au moins 25 fois plus mauvaise, car l'atmosphère brouille en partie les images. Ce sont les cellules turbulentes dans des couches atmosphériques vers 10 km et au niveau du sol qui, en modulant l'indice de réfraction de façon aléatoire via les fluctuations de température, introduisent des retards ou des avances de chemin optique qui atteignent plusieurs microns. Il s'ensuit une distorsion du front d'onde qui, de plan, devient bosselé. Comme ces cellules sont transportées par le vent, à la dégradation des images s'ajoute une évolution rapide. Ainsi, à très courtes poses (10 ms), l'image d'une étoile apparaît alors éclatée en petites taches dansantes (tavelures ou speckles), dont la somme sur une pose longue formera une tache étalée de 1 seconde d'arc typiquement, au mieux la moitié, dans les meilleurs sites mondiaux comme le mont Paranal au Chili ou le sommet du Mauna Kea à Hawaï.

Proposée par Babcock (qui vient de s'éteindre en 2003), l'idée de l'optique adaptative est de contrebalancer en temps réel les déformations du front d'onde en contrôlant de façon opposée la surface d'un miroir souple. Comme la distribution des cellules turbulentes suit une loi de type Kolmogorov, l'essentiel des défauts de phase se retrouve aux plus basses fréquences spatiales, ou dit autrement, la correction concerne surtout les grandes ondulations du front d'onde qui sont contrôlables avec relativement peu d'actionneurs sur le miroir déformable, un avantage important. Un autre avantage exploité est le caractère achromatique des variations de chemin optique : comme c'est la phase qui est la grandeur importante dans le processus de dégradation des images, se déplacer vers l'infrarouge apporte un gain très important. Un analyseur de surface d'onde, qui en général utilise la lumière d'une étoile très proche de la source visée, de façon à ce que ses rayons subissent les mêmes effets, mesure à cadence élevée (500 à 1000 Hz) les déformations de la surface d'onde en la divisant en zones (sous-pupilles).

NAOS (Nasmyth Adaptive Optics System) est le système d'optique adaptative installé sur Yepun, l'un des quatre télescopes géants du Very Large Telescope de l'ESO en opération au sommet du Cerro Paranal au Chili. NAOS a été construit par l'ONERA (maître d'œuvre), l'Observatoire de Paris (LESIA et GEPI) et le laboratoire d'Astrophysique de Grenoble, avec la participation de la division technique de l'INSU du CNRS.

NAOS est un système intégré et autonome, faisant appel à de l'optique, de l'électronique, de la mécanique et de l'informatique de pointe. Il fournit à la caméra CONICA (COude Near Infrared CAmera) un faisceau corrigé des effets de la turbulence atmosphérique. NAOS tourne sur lui-même pour compenser la rotation de l'image et, malgré ses $2,3 \text{ tonnes}$, maintient le foyer corrigé à un micron près !

L'analyse de surface d'onde est faite, selon les objets observés, soit dans le visible, soit dans l'infrarouge proche ($0,9$ - $2,5 \mu\text{m}$) jusqu'à 600 fois par seconde. L'analyseur infrarouge développé par le LESIA, un système unique au monde, a joué un rôle majeur dans l'observation du Centre Galactique qui est totalement obscurci par la poussière interstellaire dans le domaine du visible. Les correc-

tions à appliquer à la surface du miroir déformable ainsi qu'à l'orientation d'un miroir de stabilisation d'image (tip-tilt) figure 1 sont calculées au même rythme élevé par un ordinateur temps réel dédié. Une image quasi parfaite est fournie en permanence à CONICA, comme l'illustre la figure 2 où sont comparées les images d'une étoile double sans et avec correction par NAOS.

Le miroir déformable (115 mm de diamètre) de la société CILAS est contrôlé en 185 points (un point tous les 7 mm) par des actionneurs piézoélectriques qui abaissent ou soulèvent sa surface de Silicium poli sur $5 \mu\text{m}$ de course. Cinq calculateurs coopèrent pour contrôler NAOS, sa mécanique, ses analyseurs de surface d'onde, son optique déformable. Le système s'auto-configère de manière optimale en fonction des conditions atmosphériques, des objets observés, de l'orientation de l'instrument et des modes d'observation de la caméra CONICA définis par l'astronome.

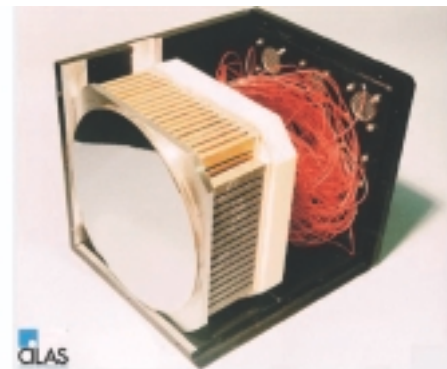


Figure 2 - Les deux miroirs de correction utilisés dans NAOS : en haut le miroir déformable de la société CILAS qui comporte 185 barreaux piézo-électriques (de couleur ocre) poussant ou tirant une lame de Silicium poli de 1 mm d'épaisseur ; en bas : le miroir deux axes développé par LESIA.



Figure 3 - Exemple de correction obtenue avec NAOS : l'image d'une étoile binaire très serrée (séparation = $0,03 \text{ secondes d'arc}$, soit 20 fois plus petite que la taille des images sans optique adaptative). À gauche : image corrigée d'une étoile simple ; au milieu : image corrigée de la binaire ; à droite : image de la binaire après traitement de l'image par un procédé de déconvolution.

turbé et restitué en sortie un faisceau corrigé qui alimente la caméra CONICA, développée par un consortium allemand.

La traque du trou noir en infrarouge

Plusieurs étoiles très proches de la source SgrA* sont suivies depuis une dizaine d'années par une équipe allemande (Max Planck de Garching) à laquelle s'est jointe il y a trois ans une partie de l'équipe française de NAOS. Les trajectoires des étoiles autour d'une très grande masse doivent en effet présenter des différences suivant que cette masse est répartie sous forme d'un amas d'une certaine dimension ou est concentrée en un objet effondré. Des éléments de telles trajectoires ont été ainsi engrangés depuis quelques années, en utilisant en particulier le premier système d'optique adaptative Adonis mis au point par les équipes françaises. Ces premières mesures ont révélé de très grandes vitesses qui impliquaient effectivement qu'une masse sombre de plusieurs millions de M_{\odot} devait résider dans un volume très petit, confondu avec la source radio SgrA*². Il s'agissait là d'un premier résultat important. C'est dans la période du printemps et de l'été 2002 que les choses se sont alors cristallisées. C'était au moment où le système NAOS/CONICA (NACO) était en phase de vérification des performances scientifiques, avant la livraison définitive à la communauté. Le Centre Galactique était l'une des cibles et la qualité de la correction donnée par NAOS s'est révélée excellente. La chance a voulu que d'une part l'une des étoiles surveillées – dénommée S2 – est passée au plus proche du centre de masse (passage au périastre) durant cette période et que, d'autre part, cette approche s'est faite à une distance remarquablement petite : seulement 17 heures-lumière. Cette étoile a ainsi constitué une sonde qui a permis d'évaluer le potentiel gravitationnel à une distance égale à peine à trois fois l'orbite de Pluton. Le fait que la trajectoire soit restée purement képlérienne (figure 4) a ainsi permis d'éliminer définitivement toute possibilité que la masse de quelques millions de M_{\odot} soit sous forme d'un amas dense stellaire sombre ou, solution nettement plus exotique, d'une boule de fermions maintenue par sa pression de Fermi : neutrinos, voire gravitinos, ou axinos³ auraient été les candidats possibles. La taille de toutes ces structures est bien plus grande que les 17 heures-lumière du périastre. Seule reste la possibilité du trou noir très massif ($3.6 \cdot 10^6 M_{\odot}$ pour l'évaluation la plus récente). Ce résultat sans ambiguïté, par ricochet, donne un très grand poids à l'hypothèse de la présence de trous noirs de très grande masse au cœur de toute galaxie et en particulier au cœur des quasars qui seraient alors dotés d'un moteur de plusieurs milliards de M_{\odot} , particulièrement efficace.

2. A proximité de SgrA* plusieurs étoiles géantes, lumineuses en infrarouge, émettent aussi une raie maser en radio : elles permettent de faire le lien entre cartes radio et infrarouge et donc une co-localisation très précise des sources.

3. Ces deux dernières entités seraient les « super-partenaires » du graviton et de l'axion que propose la théorie de la super-symétrie qui cherche à unifier les trois forces fondamentales.

Depuis l'été 2002, NACO et ses capacités uniques ont permis de conforter ce résultat : entre mai et juillet 2003, la contrepartie infrarouge de l'émission radio propre au trou noir a été détectée pour la première fois. La mesure dans le domaine 3-5 μm d'une émission « calme » correspond assez précisément à ce que prévoient les modèles qui décrivent l'émission radio et en rayons X, c'est-à-dire le rayonnement synchrotron d'électrons relativistes dans un jet très collimaté de plasma produit en permanence : celui-là même qui est à l'origine de l'émission radio détectée primitivement. Seule l'optique adaptative a permis de séparer cette source faible au milieu de la profusion d'étoiles proches. Plus spectaculaires encore, des sursauts intenses d'une émission à plus courte longueur d'onde (1.65 et 2.16 μm) ont pu être observés à quatre reprises, exactement à la position de SgrA*, chacun ayant une durée d'environ 90 minutes. Ces bouffées témoigneraient quant à elles de phases d'accrétion de matière qui franchit l'horizon du trou noir. Cette fois ce n'est plus le jet qui serait détecté, mais bel et bien la matière du disque qui tomberait par vagues successives sur l'horizon du trou noir. C'est une hypothèse d'autant plus séduisante qu'une modulation périodique de 17 minutes est observée au cours des bouffées : elle pourrait correspondre à la période de la dernière orbite stable autour du trou noir, distance en deçà de laquelle la matière ne peut plus se maintenir en orbite autour du trou noir, mais tombe irrémédiablement et rapidement sur son horizon. Une telle orbite est très contrainte du point de vue théorique dans le cas d'un trou noir en rotation (dit de Kerr) : les 17 minutes observées correspondraient alors à 2 fois la limite inférieure prédite pour un trou noir d'une telle masse. Les trous noirs sont des entités somme toute assez simples à décrire : on montre qu'ils sont caractérisés totalement par 3 paramètres seulement : leur

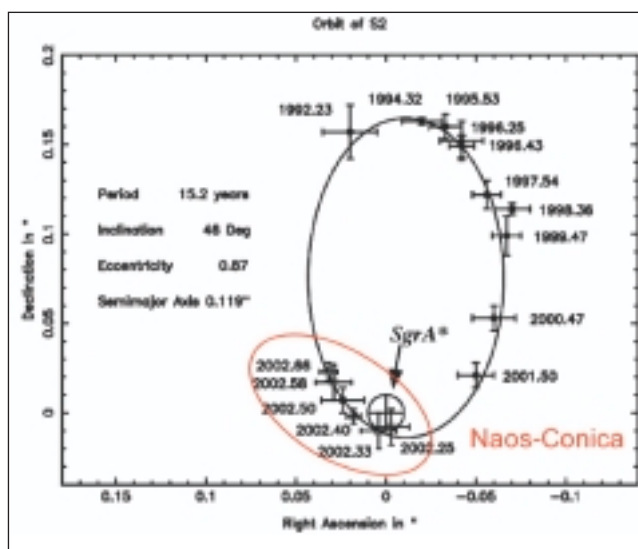


Figure 4 - Trajectoire de l'étoile S2 autour de la masse centrale de 3,6 millions de M_{\odot} au centre de notre Galaxie. Les points cerclés de rouge sont ceux obtenus avec le système NACO, lors du point d'approche minimum de mai à août 2002. Noter l'échelle : l'orbite a un grand axe de 0,2" seulement. On n'observe que la projection sur le plan du ciel de la trajectoire elliptique : il est normal que SgrA* ne soit pas au foyer apparent.

masse, leur moment angulaire – c'est-à-dire leur rotation propre – et leur charge. Avec les mesures en infrarouge à haute résolution angulaire qu'a permises NAOS/CONICA, le premier de ces paramètres est désormais très bien déterminé ; il est vrai-

semblable que le second le soit aussi : la prochaine campagne d'observation devra le confirmer. Il restera alors à mesurer la charge. L'ère de la physique expérimentale des trous noirs aurait-elle vraiment commencé avec ces mesures ?

Encadré 2

Trous noirs supermassifs et accrétion

Déjà imaginé par Laplace au XVIII^e siècle, le concept du trou noir ne trouve sa cohérence qu'avec la relativité générale d'Einstein qui traduit la gravitation en termes de distorsion de l'espace-temps : les rayons lumineux qui matérialisent sa trame sont déformés au voisinage de corps massifs. La théorie associe ainsi à toute masse un rayon critique : si la masse est concentrée dans la sphère de rayon critique alors aucune particule, y compris le photon, ne peut en sortir. Ce rayon, dit de Schwarzschild ou encore horizon, est défini en égalant l'énergie potentielle $GmM_{\text{TN}}/R_{\text{H}}$ d'une masse m et son énergie cinétique maximum, c'est-à-dire $1/2 mc^2$, ce qui conduit à la relation : R_{H} (km) $\approx 3 M(M_{\odot})$. Plusieurs types de trous noirs sont prédits par les astrophysiciens. L'effondrement du cœur d'une étoile dont la masse initiale est supérieure à $45 M_{\odot}$ conduit à la formation d'un trou noir stellaire : quand la masse du cœur dépasse $3 M_{\odot}$, même les forces de répulsion de la matière dégénérée (électrons et neutrons) ne peuvent s'opposer à la formidable pression de gravité. On constate qu'à la différence d'un trou noir de la masse de la Terre qui devrait être dans un état extrêmement condensé dans un volume de 1 cm^3 , un trou noir de plusieurs milliards de masses solaires est beaucoup moins dense. De tels trous noirs ultra-massifs peuvent s'être formés à partir de la fusion de trous noirs stellaires issus d'amas très denses d'étoiles tels ceux qu'on trouve au centre des galaxies.

Ce postulat de l'existence de trous noirs ultra-massifs au cœur de certaines galaxies (en fait probablement toutes) est à la base du paradigme du « moteur central » des quasars et des noyaux actifs de galaxie. Les quasars, découverts en 1961, présentent trois caractéristiques : ils sont extrêmement lumineux, extrêmement compacts et sont des sources intenses de rayonnement Ultra-Violet et X. On déduit le premier caractère en comparant leur éclat à leur immense distance – plusieurs milliards d'années-lumière – mesurée grâce au décalage Doppler de leur spectre : on trouve alors qu'ils rayonnent typiquement 10^{40} W , soit plusieurs centaines de fois la luminosité des galaxies les plus brillantes. La compacité, le deuxième caractère, est indiquée d'abord par la taille apparente sur le ciel qui est celle d'une étoile non résolue (d'où leur nom de Quasi Stellar Objects) et surtout par leurs variations erratiques d'éclat sur des temps Δt entre quelques heures et quelques semaines : leur taille linéaire ne peut qu'être inférieure à $c\Delta t$ longueur qui est bien inférieure à la dimension des condensations au centre des galaxies. Le troisième caractère, l'émission en X et en Ultra-Violet témoigne enfin de la nature probable du processus d'émission : le rayonnement de corps noir d'un plasma à plu-

sieurs millions de degrés. Comment produire une luminosité aussi formidable dans un volume aussi petit ? La fusion nucléaire en est incapable avec son rendement de 1 % de conversion de l'énergie de masse mc^2 . Un mécanisme beaucoup plus efficace en revanche, consiste à amener de l'infini cette masse m jusqu'à l'horizon d'un trou noir : si on peut récupérer toute l'énergie potentielle, c'est alors, par définition de l'horizon R_{H} , 50% de l'énergie de masse qui devient disponible. La matière concernée ne doit cependant pas franchir l'horizon en chute libre, mais spiraler d'abord dans un « disque d'accrétion » pour s'échauffer par viscosité – ce qui est inévitable aux vitesses relativistes concernées – pour que le plasma ainsi créé puisse convertir en rayonnement l'énergie récupérée. C'est d'ailleurs cette même viscosité qui va permettre d'évacuer le moment angulaire de la matière dans le disque d'accrétion, une condition à la chute effective sur le trou noir. La formation d'un jet, effectivement observé dans quelques cas, perpendiculaire au disque, contribue également à cette nécessaire perte de moment angulaire. Un tel mécanisme n'est pas que théorique : il est à la base de l'émission X des étoiles dites « binaires X » où une partie des couches externes d'une étoile peut être accrétées par un compagnon très compact (une étoile à neutrons, pas un trou noir). Appliqué à un quasar, on trouve que l'accrétion de 10 étoiles de type solaire par an sur un trou noir d'un milliard de masse solaire permet de fournir la luminosité observée. Pourquoi un milliard de masse solaire ? C'est Eddington qui a remarqué qu'il y avait une limite supérieure à la luminosité d'un trou noir de masse donnée : en effet la pression de radiation crée une auto-limitation au processus d'accrétion. $10^9 M_{\odot}$ est alors la masse minimum du trou noir fournissant les 10^{40} W observés. Par ailleurs un trou noir de $10^9 M_{\odot}$ a un rayon de Schwarzschild de 3 heures-lumière, cohérent avec les variations d'éclat observées. En effet, on considère que l'émission doit provenir surtout de la région proche de ce qu'on appelle la « dernière orbite stable », i.e. le rayon en deçà duquel la matière ne peut se maintenir en orbite, mais doit chuter irrémédiablement et rapidement sur l'horizon, une conséquence de la relativité générale ; pour un trou noir sans rotation, cette orbite a un rayon égal à $3R_{\text{H}}$.

On notera enfin « qu'un trou noir n'a pas de poils », boutade du physicien Wheeler qui traduit le fait que ces objets étranges sont caractérisés complètement par seulement trois paramètres : leur masse, leur charge et leur spin. Au passage, on montre que le spin va affecter le rayon de la dernière orbite stable : si ce rayon est mesurable, on doit alors pouvoir remonter au spin.

Pour en savoir plus

- GENZEL (R.) *et al.*, 2003, Nature 425, 934.
 SCHOEDEL (R.) *et al.*, 2002, Nature 419, 694.
 CLÉNET (Y.) *et al.*, 2004, Astron. & Astrophys., 424, L21.
 ROUSSET (G.) *et al.*, 2003, SPIE 4839, 140.