

L'ombre d'un trou noir

Grâce à un réseau de télescopes répartis sur l'ensemble du globe, les astronomes pourront bientôt voir pour la première fois la silhouette d'un trou noir.

Avery BRODERICK est chercheur à l'Institut canadien d'astrophysique théorique de l'Université de Toronto.

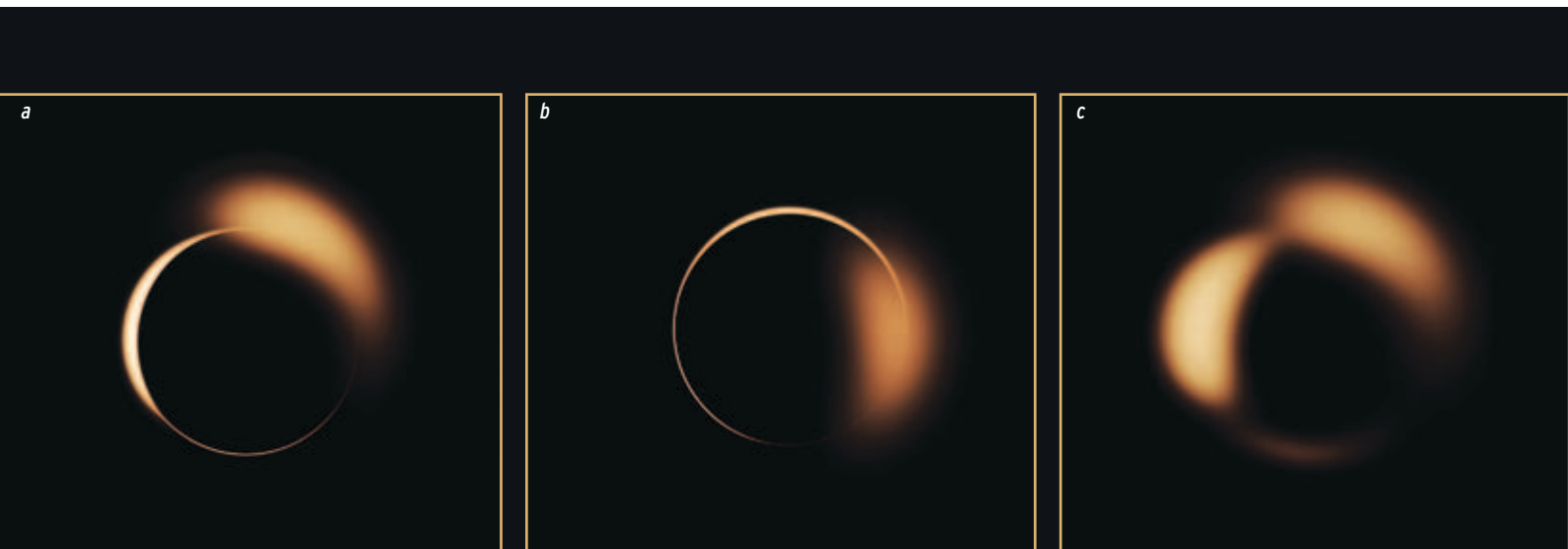
Abraham LOEB est professeur d'astronomie à l'Université Harvard, aux États-Unis, et professeur visiteur à l'Institut Weizmann, en Israël.

Aller étudier sur place le trou noir supermassif installé au cœur de la Voie lactée, Sagittarius A* (Sgr A*), serait une expérience unique, mais risquée. À partir de dix millions de kilomètres du trou noir, les messages d'un intrépide spationaute nous sembleraient de plus en plus ralentis et de plus en plus graves et moins audibles, pour finir en un murmure monocorde. Son image deviendrait de plus en plus rouge et de plus en plus pâle à l'approche de l'horizon du trou noir, la frontière au-delà de laquelle plus rien, pas même la lumière, ne peut échapper de la gravité.

Mais l'explorateur lui-même ne percevrait aucune de ces manifestations du ralentissement temporel et ne verrait rien de particulier en traversant l'horizon. Il ne saurait qu'il a franchi le point de non-retour que parce qu'il nous entendrait crier : « Nous ne t'entendons plus ! » Il n'aurait aucun moyen de partager ses dernières impressions. Moins d'une minute après avoir franchi l'horizon, il serait de toute façon mis en pièces par la gravité.

Voir de près un trou noir est bien sûr impossible. Néanmoins, de nouvelles techniques permettront bientôt d'obtenir des images directes de ces objets. Elles nous aideront à mieux comprendre les extraordinaires processus physiques à l'œuvre dans leur voisinage. Certes, de nombreuses observations de trous noirs, assorties de diverses images, ont déjà été faites, mais au sens strict, ces images sont celles du gaz incandescent en orbite autour du trou noir, ou de la matière éjectée par celui-ci. Le trou noir lui-même reste invisible.

En fait, nous ignorons même si les trous noirs existent vraiment. Les astronomes ont détecté des objets massifs et compacts qui se comportent conformément aux trous noirs prédits par la théorie de la relativité générale d'Einstein, et des résultats théoriques indiquent que la formation des trous noirs est inéluctable dans le cadre d'effondrements gravitationnels. On admet donc généralement que les objets compacts observés sont bien des trous noirs. Mais nous n'avons aucune preuve



observationnelle de ce qui définit un trou noir, à savoir un horizon des événements.

Les trous noirs posent de nombreuses questions. Le concept d'horizon des événements cristallise par exemple une incompatibilité entre la relativité générale et la physique quantique. Selon cette dernière, l'information de départ peut être retrouvée après toute transformation d'un système physique. L'information portée par la matière engloutie derrière l'horizon d'un trou noir doit ainsi être restituée sous une forme ou une autre. En revanche, selon la relativité générale, toute information qui pénètre dans un trou noir ne peut en ressortir. Pour lever cette incompatibilité, une théorie quantique de la gravité est nécessaire.

Le trou noir, cet inconnu

À un niveau moins fondamental, les physiciens aimeraient savoir jusqu'où la relativité générale est correcte. Le fait qu'elle prédise l'existence d'objets dérangeants comme les singularités (les points de densité infinie au centre des trous noirs) est en effet un signe de ses limitations. Les trous noirs ont à cet égard deux qualités : ce sont des solutions très simples aux équations de la relativité (un trou noir est entièrement caractérisé par trois grandeurs seulement, sa masse, sa charge et son moment cinétique) et ce sont les lieux où les conditions sont les plus extrêmes et où la gravité s'écarte le plus de la description newtonienne. Ainsi, ils offrent un terrain pour pousser la relativité générale dans ses retranchements.

D'autres questions sont plus concrètes, mais tout aussi passionnantes. Les trous noirs supermassifs se « nourrissent » du gaz et de la poussière qui tombent vers eux. En se rapprochant de l'horizon du trou noir, la matière est accélérée, comprimée et chauffée à un point tel que le rayonnement qui s'en dégage fait de l'environnement direct des trous noirs les objets les plus brillants de l'Univers. Un trou noir supermassif produit de l'énergie à partir de la matière

qui l'entoure avec un rendement 20 fois supérieur à celui de la fusion nucléaire!

Si on parvient à modéliser en partie le comportement de la matière au sein du disque d'accrétion qui entoure le trou noir, on ne sait pas exactement comment le gaz migre d'une orbite éloignée vers une orbite proche, ni comment il finit par tomber dans le trou noir. Les champs magnétiques créés par le mouvement des particules chargées dans le disque doivent jouer un rôle clé dans le processus d'accrétion. Cependant, nous savons peu de choses de ces champs et de leurs effets sur les trous noirs. Des simulations numériques de la région d'accrétion deviennent possibles, mais les théoriciens sont encore loin de pouvoir faire des calculs *ab initio*. L'apport des observations sera vital pour inspirer de nouvelles idées et trancher entre les modèles concurrents.

Encore plus lacunaire est notre compréhension des jets souvent associés aux trous noirs supermassifs. Une partie de la matière qui tombe sur le trou noir est accélérée et éjectée à des vitesses ultrarelativistes (jusqu'à 99,98 pour cent de la vitesse de la lumière), échappant ainsi à l'engloutissement. Cette éjection prend la forme de deux faisceaux intenses et extrêmement focalisés, qui se prolongent sur des distances plus grandes que des galaxies. Qu'est-ce qui accélère ces jets monstrueux, et de quoi sont-ils formés? Pour répondre, les observations directes d'un trou noir et de son voisinage sont indispensables.

Malheureusement, de telles observations sont difficiles, et ce pour plusieurs raisons. D'abord, les trous noirs sont très petits par rapport aux échelles astronomiques habituelles. On en distingue deux sortes : les trous noirs stellaires, vestiges d'étoiles massives, dont la masse est de 5 à 15 masses solaires, et les trous noirs supermassifs, au cœur des galaxies, et dont la masse varie de quelques millions à plusieurs milliards de masses solaires (voir *Les trous noirs supermassifs*, par K. Weaver, page 112). Il

L'ESSENTIEL

➔ Les trous noirs sont parmi les objets les plus mystérieux de l'Univers. On ne les a observés que de façon indirecte, par le biais de leurs effets gravitationnels et du rayonnement émis par le gaz qui tombe sur eux.

➔ L'interférométrie à très longue base, qui consiste à coupler les observations de radiotélescopes répartis sur toute la planète, devrait fournir des images directes des trous noirs supermassifs.

➔ On éclaircirait alors les phénomènes en jeu près des trous noirs, et on testerait la théorie de la relativité générale dans des conditions de gravité extrême.



LE TROU NOIR CENTRAL de la Voie lactée pourrait ressembler à ces simulations informatiques, lorsqu'un réseau de radiotélescopes l'observera dans les années à venir. La silhouette de l'horizon des événements se découpera sur le fond de l'émission due au gaz brûlant du disque d'accrétion (a et b). Le gaz interstellaire brouillera cependant l'image réelle (c, d et e).

Avery E. Broderick

existerait également des trous noirs intermédiaires, de quelques milliers de masses solaires, mais on sait encore peu de chose sur ces objets (voir *Les trous noirs de masse intermédiaire*, par J. Laval, page 102). Un trou noir de 15 masses solaires aurait un horizon de 90 kilomètres de diamètre environ ; une taille bien trop petite même pour les meilleurs télescopes.

La panoplie d'astronome

Une deuxième difficulté est que la petite taille et la gravité intense de ces objets impriment à la matière en orbite un mouvement ultrarapide : des instruments extrêmement sensibles sont nécessaires pour observer un phénomène si rapide. De fait, seuls les trous noirs dotés d'un réservoir de gaz assez grand et assez proche pour être alimentés sont détectables. La grande majorité des trous noirs de la galaxie, obscurs, restent sans doute à découvrir.

Face à ce défi, les astronomes ont développé une panoplie de techniques qui ont apporté des informations précieuses sur les propriétés et le comportement de la matière en orbite autour des trous noirs. On sait par exemple évaluer la masse d'un trou noir supermassif en observant le mouvement des étoiles dans ses parages. Dans une galaxie distante, les étoiles individuelles ne peuvent être distinguées, mais le décalage par effet Doppler visible dans leur spectre lumineux lorsqu'elles s'approchent ou s'éloignent de nous indique la distribution de leurs vitesses, dont

on déduit la masse du trou noir. On a ainsi « peser » Sgr A*, le trou noir supermassif central de la Voie lactée, situé à 26 000 années-lumière : sa masse, serait de 4,5 millions de masses solaires. Malheureusement, les étoiles suivies sont encore loin du trou noir, comparativement à la taille de son horizon ou même de son disque d'accrétion.

Les astronomes cherchent aussi la signature de la relativité générale dans les variations temporelles du rayonnement émis par un trou noir. L'émission en rayons X de certains trous noirs stellaires, par exemple, fluctue de façon quasi périodique, avec des périodes qui suggèrent que l'émission provient du gaz en orbite sur le bord interne du disque d'accrétion.

Aujourd'hui, la méthode la plus fructueuse pour caractériser les trous noirs supermassifs est la spectroscopie. La rotation rapide du disque d'accrétion et le potentiel gravitationnel du trou noir se combinent pour décaler et étaler les raies d'émission caractéristiques dans le spectre lumineux du disque d'accrétion. La relativité générale prédit en effet que près d'un trou noir en rotation rapide, l'espace-temps est déformé de sorte que les orbites circulaires proches sont plus stables. Le bord interne du disque d'accrétion se situe alors plus près du trou noir et le gaz y tourne donc plus vite. En conséquence, à masse égale, le décalage des raies spectrales est plus prononcé pour un trou noir en rotation que pour un trou noir statique.

Une telle asymétrie de la raie d'émission caractéristique de la fluorescence du fer a été mise en évidence autour d'étoiles compactes. Ce serait la preuve de la présence de trous noirs massifs en rotation rapide. La vitesse orbitale du gaz dans le disque d'accrétion atteindrait dans certains cas un tiers de la vitesse de la lumière !

Le moment cinétique des trous noirs stellaires a, pour sa part, été surtout étudié dans les systèmes binaires, où un trou noir aspire lentement le gaz d'une étoile compagne. L'analyse des spectres en rayons X et des paramètres orbitaux de quelques systèmes binaires indique que le moment cinétique de ces trous noirs varie entre 65 et 100 pour cent du moment cinétique maximal autorisé par la relativité générale : la rotation très rapide semble être la norme.

D'autres manifestations des trous noirs sont traquées. Lorsque deux trous noirs entrent en collision, l'événement secoue la trame de l'espace-temps et crée des ondes gravitationnelles, qui se propagent dans l'espace-temps à la vitesse de la lumière. Des dispositifs déjà en fonctionnement devraient détecter ces ondes dans la prochaine décennie. Ce serait un moyen révolutionnaire pour étudier les trous noirs.

Cependant, aucune des méthodes d'observation précédentes ne montre directement l'horizon des événements d'un trou noir. Néanmoins, de récents progrès laissent entrevoir une telle possibilité. La cible idéale est Sgr A* qui, compte tenu de sa taille, de sa distance et de son diamètre

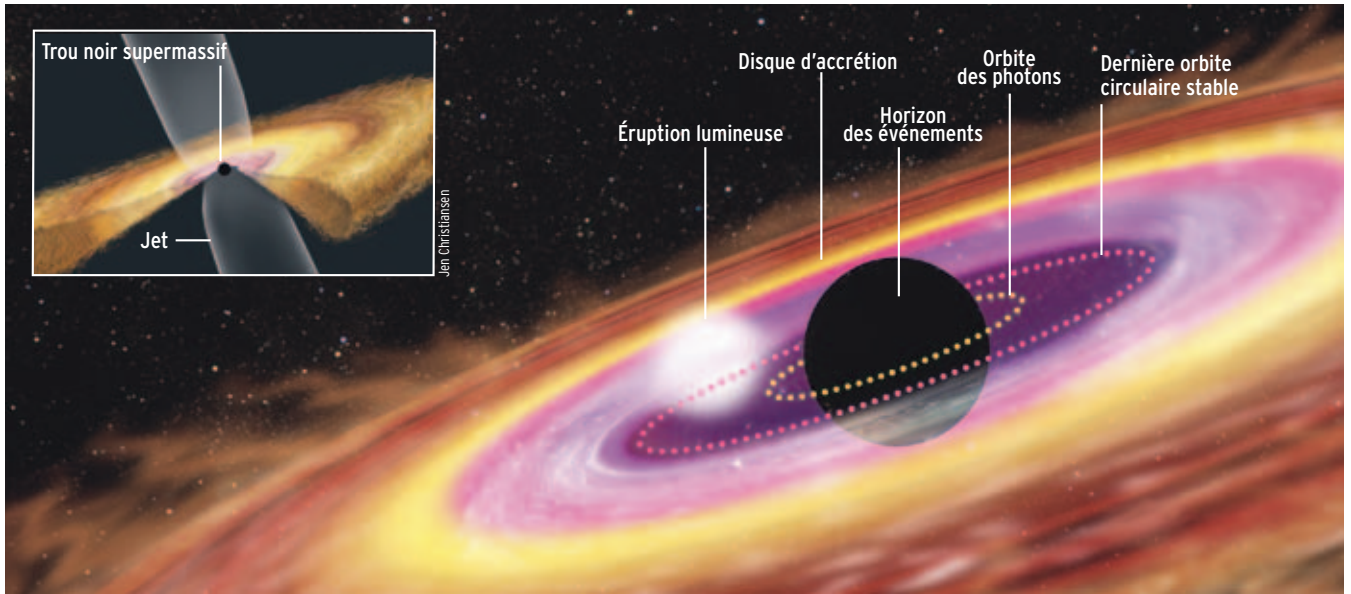
DERNIÈRES NOUVELLES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

Une observation interférométrique n'est pas vraiment une image, mais elle permet de reconstituer une partie de l'information de celle-ci. Ce qui détermine la quantité et la qualité d'information récupérée est le nombre et la position relative des télescopes utilisés lors des observations : cette information est d'autant plus importante que le nombre de télescopes est élevé et la distance les séparant est grande.

Pour passer des observations à la vraie image, on doit présupposer que l'objet observé est décrit par un certain nombre de paramètres dont les valeurs sont déterminées en fonction de leur adéquation avec les données recueillies. Quand l'image de départ est simple, par exemple un disque stellaire uniquement déterminé par son diamètre et son éventuel aplatissement, alors la reconstruction ne pose guère de problème, même avec un petit nombre de télescopes. En revanche, la reconstruction restera d'autant plus hasardeuse que l'image est complexe et mal connue *a priori*. De fait, deux images distinctes peuvent se traduire par des données interférométriques identiques, surtout si celles-ci sont peu nombreuses.

Aujourd'hui, grâce à un modèle réaliste, mais incertain, de ce que pourrait être la silhouette du trou noir Sgr A* et de son disque d'accrétion, on peut déterminer le diamètre du trou noir, son moment cinétique et l'inclinaison de son disque. Mais ce résultat, déjà remarquable, n'est fondé que sur la combinaison de trois radiotélescopes qui ne sont pas très éloignés. Pour s'assurer de la pertinence du processus de reconstruction, on doit attendre des points d'observation supplémentaires et plus distants. Quand ils seront disponibles (sans doute bientôt), alors seulement nous pourrions prétendre avoir vu, pour la première fois, la silhouette d'un trou noir se découplant sur son disque d'accrétion.

Alain RIAZUELO, Institut d'astrophysique de Paris



angulaire (sa taille apparente) serait le plus grand de tous les trous noirs connus.

En réalité, la taille apparente d'un trou noir est plus que doublée par rapport à un astre classique de même diamètre, car les photons qui s'approchent à moins d'un demi-rayon de l'horizon sont déviés par la gravité du trou noir avant d'être engloutis. Mais même ainsi, le disque noir de l'horizon de Sgr A* ne couvre pas plus de 55 microsecondes d'arc, c'est-à-dire l'épaisseur d'un cheveu vu à 380 kilomètres.

La résolution théorique de tous les télescopes, quels qu'ils soient, est limitée par la diffraction de la lumière : la taille des plus petits détails (la résolution) pouvant être distingués est proportionnelle à la longueur d'onde du rayonnement observé, et inversement proportionnelle au diamètre du télescope. Le diamètre requis pour atteindre une résolution de 55 microsecondes d'arc avec des longueurs d'onde courtes est techniquement irréaliste.

Le pari de l'interférométrie

En lumière visible, même un télescope de 100 mètres de diamètre aurait une résolution 20 fois trop faible. En outre, dans cette plage de longueurs d'onde, Sgr A* est caché par la poussière qui masque le cœur de la galaxie. La sonde idéale pour percer cet écran est le rayonnement infrarouge, mais sa longueur d'onde est encore plus grande : pour distinguer Sgr A*, un télescope devrait avoir un diamètre de sept kilomètres... Pour une résolution nécessaire en ondes radio millimétriques, ce diamètre serait de 5 000 kilomètres ! Et pourtant, des radiotélescopes de cette taille et au-delà existent déjà. Comment ?

L'interférométrie à très longue base (ou VLBI pour *Very Long Baseline Interferometry*) consiste à combiner les signaux détectés par un réseau de radiotélescopes, répartis tout autour du globe et reliés par des « lignes de base », pour atteindre la même résolution angulaire

UN TROU NOIR est d'abord caractérisé par son horizon des événements, en deçà duquel rien ne peut s'échapper. Les trous noirs supermassifs, de plusieurs millions de masses solaires, sont alimentés en gaz et en poussière via un disque d'accrétion, en rotation rapide. En tombant sur le trou noir, le matériau, chauffé, rayonne intensément. De nombreux trous noirs supermassifs émettent en outre de puissants jets relativistes. Le bord interne du disque d'accrétion serait près de la « dernière orbite circulaire stable », en deçà de laquelle toute matière plonge rapidement dans le trou noir. Plus près, sur l'orbite dite des photons, la lumière pourrait en principe tourner à l'infini autour du trou noir sans jamais y tomber, mais cette orbite est instable.

théorique qu'une antenne radio virtuelle de la taille de la Terre. Deux réseaux de télescopes de ce type sont en service : le VLBA (*Very Long Baseline Array*), américain et le réseau européen EVN (*European VLBI Network*) dont les antennes sont situées en Chine, en Afrique du Sud, à Porto Rico, en Allemagne...

Hélas, le VLBA et l'EVN ne conviennent qu'aux longueurs d'onde radio supérieures à 3,5 millimètres, ce qui correspond à une résolution maximale de 100 microsecondes d'arc. De plus, à ces longueurs d'onde, la diffusion par le milieu interstellaire brouille les images. La solution serait de mettre en place un interféromètre fonctionnant à des longueurs d'onde plus courtes, millimétriques ou submillimétriques.

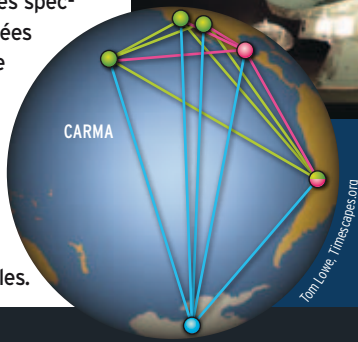
Ces dernières posent cependant un autre problème : elles sont absorbées par la vapeur d'eau de l'atmosphère terrestre. C'est pourquoi les télescopes millimétriques et submillimétriques sont situés sur les sites arides et en altitude, tels le sommet du Mauna Kea à Hawaï, le désert d'Atacama au Chili, en Antarctique... Quand toutes ces contraintes sont prises en compte, il reste deux fenêtres radio exploitables, à 1,3 et 0,87 millimètre de longueur d'onde. Un réseau interférométrique de la taille de la Terre à ces longueurs d'onde offrirait une résolution suffisante pour distinguer l'horizon de Sgr A*.

Un certain nombre de télescopes millimétriques et submillimétriques que l'on pourrait intégrer à un tel réseau existent déjà, à Hawaï, au Chili, en Europe, etc. Mais ils ont été construits avec d'autres objectifs, et leur adaptation pour l'interférométrie à très longue base soulève de nombreux défis technologiques, notamment le développement d'oscillateurs haute fréquence très stables ou celui d'une électronique à bas bruit de fond.

Néanmoins, ces problèmes ont été résolus et en 2008, le groupe de Sheperd Doeleman, de l'Institut de technologie du Massachusetts, a observé

PRENDRE UN TROU NOIR EN PHOTO

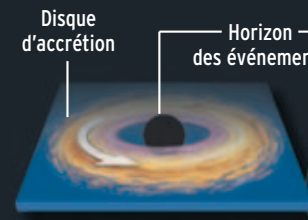
Les astronomes développent un réseau de télescopes radioastronomiques à l'échelle de la Terre pour observer le trou noir supermassif SgrA* et son environnement immédiat à des longueurs d'onde proches de 0,87 et 1,3 millimètre, deux «fenêtres spectrales» modérément absorbées par l'atmosphère terrestre ou diffusées par le gaz interstellaire. Ce réseau aura une résolution suffisante pour obtenir des images de l'horizon du trou noir. On obtiendra alors de nombreuses informations cruciales.



DES RADIOTÉLESCOPES EN RÉSEAU

Un réseau d'observatoires radioastronomiques (en vert, les observatoires prêts, en rose, ceux en cours de développement et en bleu, celui qui doit être modifié), distants de plusieurs milliers de kilomètres, peut produire des images avec une résolution aussi bonne qu'une antenne radio parabolique de la taille de la Terre (mais avec une luminosité moindre).

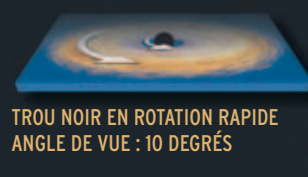
Tom Lowe, Timescapes.org



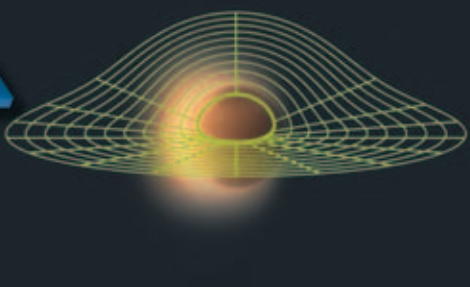
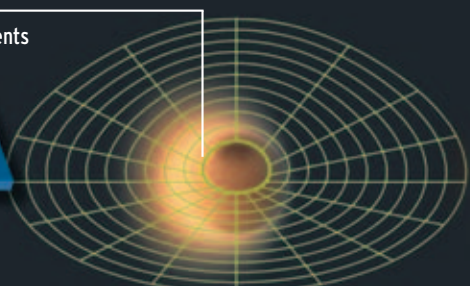
Disque d'accrétion
Horizon des événements
TROU NOIR STATIQUE
ANGLE DE VUE : 30 DEGRÉS



TROU NOIR STATIQUE
ANGLE DE VUE : 10 DEGRÉS



TROU NOIR EN ROTATION RAPIDE
ANGLE DE VUE : 10 DEGRÉS



55 microsecondes d'arc

L'INCLINAISON

Ces simulations montrent le trou noir Sgr A* selon l'orientation du disque d'accrétion et sa vitesse de rotation. Les images de droite tiennent compte de la diffusion par le gaz interstellaire. La grille verte représente la trame de l'espace-temps dans le plan du disque d'accrétion. Le bord interne correspond à l'horizon des événements. La courbure de l'espace-temps par la gravité du trou noir, matérialisée par la déformation de la grille, dévie les rayons lumineux émis par le gaz chaud, de sorte que la lumière venant de derrière le trou noir est visible autour de la silhouette. La vitesse de rotation du disque d'accrétion approchant celle de la lumière, l'effet Doppler relativiste rend l'émission plus brillante du côté qui s'approche de nous (à gauche). Dans la troisième simulation, la rotation rapide du trou noir entraîne l'espace-temps, déformant encore davantage l'image du disque d'accrétion. En comparant des images de SgrA* avec ces simulations, on pourra déduire l'orientation du système et la vitesse de rotation du trou noir. Le diamètre de la silhouette donne aussi une mesure de sa masse.

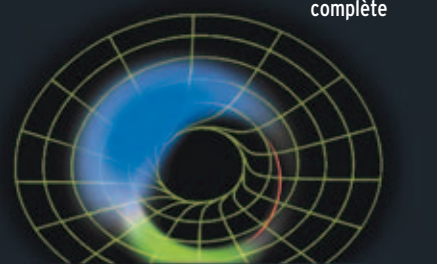


Image simulée complète

Tache brillante

UNE MESURE DE LA GRAVITÉ

On peut étudier le champ gravitationnel aux abords d'un trou noir en observant les images multiples d'une éruption lumineuse dans le disque d'accrétion. Ci-dessus, une simulation montre que l'image d'une tache brillante près d'un trou noir en rotation est formée de trois sous-images distinctes. L'image primaire (en bleu) se forme à partir des rayons lumineux qui se sont propagés en ligne directe vers nous depuis la tache. En raison de la gravité intense, certains rayons émis un peu plus tôt par l'éruption au cours de sa rotation contournent le trou noir et atteignent la Terre en même temps que les rayons directs, formant une image secondaire (en vert). Des rayons émis encore plus tôt et qui ont exécuté une orbite complète autour du trou noir engendrent une image tertiaire, à peine visible (en rouge). Puisque la position et la forme des images supplémentaires dépendent de la façon dont la gravité courbe la lumière autour du trou noir, l'image complète révélera si la relativité générale décrit correctement la situation.

Avery E. Broderick/Jen. Christiansen

le trou noir Sgr A* à 1,3 millimètre de longueur d'onde avec un réseau de trois télescopes seulement. Trop peu de données ont été collectées pour obtenir une image complète, mais c'est un succès, car les données indiquent des régions brillantes de seulement 37 microsecondes d'arc, soit les deux tiers de la taille angulaire de l'horizon de Sgr A*. Avec des télescopes supplémentaires, des images de la silhouette du trou noir sont à notre portée.

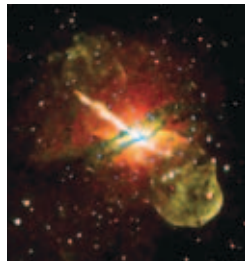
Un croissant brillant

Bien que limitées, ces observations montrent déjà que Sgr A* est probablement un trou noir et non un objet compact classique, sans horizon des événements. L'accrétion est fondamentalement différente selon l'astre. Le matériau accrété acquiert une énergie énorme au cours de sa chute. Si l'objet central n'a pas d'horizon, toute cette énergie doit être convertie en chaleur et donc en rayonnement lorsque le matériau s'écrase à la surface de l'astre, et ainsi produire un spectre d'émission thermique caractéristique. À l'inverse, le matériau qui tombe dans un trou noir peut emporter avec lui une quantité quelconque d'énergie derrière l'horizon, où elle sera définitivement soustraite à notre vue.

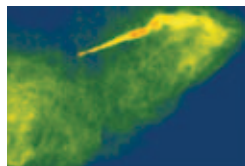
La luminosité totale de Sgr A* rend compte de l'énergie totale produite pendant l'accrétion de matière. Les observations en VLBI posent une limite sur le diamètre maximal du bord interne du flot d'accrétion, et ainsi sur la quantité d'énergie libérée dans la chute de la matière jusqu'à ce rayon. Si Sgr A* n'a pas d'horizon des événements, le reste de l'énergie (par rapport à l'énergie totale) doit être rayonné quand le matériau accrété atteint l'objet compact, en émettant principalement dans l'infrarouge. Or aucune émission thermique infrarouge émanant de Sgr A* n'a été détectée.

Plusieurs équipes de théoriciens, dont la nôtre, ont essayé de prédire ce que des observateurs pourraient voir quand l'interférométrie à très longue base produira des images de Sgr A*. En premier lieu, une silhouette noire se découpera sur la toile de fond faiblement lumineuse du gaz en accrétion. Le trou noir piège en effet les rayons lumineux qui viennent de derrière et vont dans la direction de l'observateur. Cette silhouette sera par ailleurs rehaussée d'un anneau brillant, constitué de rayons lumineux originaires de derrière le trou noir et déviés par son champ gravitationnel. Dans ce portrait, le trou noir est vraiment noir (*voir la figure page 97*).

Pour autant, l'image ne sera pas circulaire comme on pourrait s'y attendre. Le gaz tournant dans le disque d'accrétion à des vitesses proches de celle de la lumière, la luminosité est augmentée du côté où le gaz s'approche de nous, et diminuée du côté qui s'éloigne du fait de l'effet Doppler. On verra ainsi un croissant brillant plutôt qu'un anneau autour de la silhouette circulaire noire.



LA GALAXIE Centaurus A (ou NGC 5128), ici vue en rayons X par le satellite *Chandra*, exhibe un jet de 13 000 années-lumière émis par le trou noir supermassif central présumé. Les taches brillantes sont des trous noirs de masse stellaire qui avalent la matière de leur étoile compagnon. Le rouge, le vert et le bleu correspondent à trois longueurs d'onde différentes.



LE TROU noir supermassif qu'abrite sans doute le centre de la galaxie M87 est entouré de lobes de gaz d'environ 15 000 années-lumière de diamètre. Il propulse un jet de matière ultrarelativiste dans notre direction. Un jet opposé est probablement aussi présent. L'image a été obtenue par le radiotélescope VLA, au Nouveau-Mexique, à une longueur d'onde radio de deux centimètres.

Science Source

Nat. Radio Astr. Obs. Nat. Sc. Found.

Par ailleurs, la rotation du trou noir lui-même déforme également son image (de façon contre-intuitive, il se produit un allongement le long de l'axe de rotation). L'axe de rotation du trou noir pouvant être différent de celui du disque d'accrétion, on pourrait distinguer les deux effets dans des images directes et donc déterminer l'axe du trou noir et l'inclinaison relative du disque.

D'autres trous noirs supermassifs devraient également être détectables par VLBI. La meilleure cible, après Sgr A*, est le trou noir supermassif supposé se trouver au centre de la galaxie elliptique géante M87, à 55 millions d'années-lumière. En juin 2009, une équipe a estimé la masse du trou noir central à quelque 6,4 milliards de masses solaires. Son diamètre apparent atteindrait alors les trois quarts de celui de Sgr A*. À de nombreux égards, M87 est une cible plus intéressante que Sgr A*. Un puissant jet s'échappe de son centre et s'étend sur plus de 5 000 années-lumière. L'observation devrait donc éclairer le mécanisme par lequel les trous noirs créent des jets ultrarelativistes aussi focalisés. Par ailleurs, contrairement à Sgr A*, M87 se situe dans le ciel de l'hémisphère Nord, où se trouvent la plupart des observatoires existants.

De plus, le trou noir central de M87 étant 1 500 fois plus gros que Sgr A*, les variations dynamiques du système se produisent à l'échelle du jour au lieu de la minute. La période orbitale à proximité du bord interne du disque d'accrétion sera de 0,5 à 5 semaines, selon le moment cinétique du trou noir. Les séquences d'images détaillant le déroulement des événements devraient ainsi être plus faciles à obtenir que pour Sgr A*. Enfin, les images devraient être moins brouillées, car M87 est plus pauvre en gaz interstellaire que notre Galaxie. À ce jour, les meilleures images en interférométrie à très longue base du trou noir central de M87 ont une résolution d'environ 100 microsecondes d'arc, plus du double de la taille apparente attendue.

Pour Sgr A* comme pour M87, l'idée à long terme est d'obtenir des images des éruptions lumineuses que l'on observe de temps en temps. Si certaines de ces éruptions sont dues à des zones temporairement plus brillantes du disque d'accrétion, elles pourraient être exploitées pour cartographier en détail l'espace-temps autour de l'horizon du trou noir. En effet, l'image principale d'une tache brillante sera accompagnée « d'échos » correspondant à des rayons lumineux qui atteindront les télescopes après avoir suivi des trajectoires indirectes contournant le trou noir. Les formes et les positions de ces images supplémentaires portent la marque de la structure de l'espace-temps dans les différentes régions traversées par les rayons lumineux qui les composent. Elles apporteraient ainsi des mesures indépendantes de la structure de l'espace-temps dans le voisinage du trou noir. Pas de doute, l'observation des trous noirs entre dans un nouvel âge d'or...

articles

- A. BRODERICK *et al.*, *The event horizon of Sagittarius A**, in *Astrophysical Journal*, vol. 701, pp. 1357-1366, 2009.
- S. DOELEMEN *et al.*, *Event-horizon-scale structure in the supermassive black hole candidate at the galactic center*, in *Nature*, vol. 455, pp. 78-80, 2008.

internet

- A. Riazuelo, *Voyage autour d'un trou noir*, vidéo : <http://youtu.be/HyhSsSGXl>