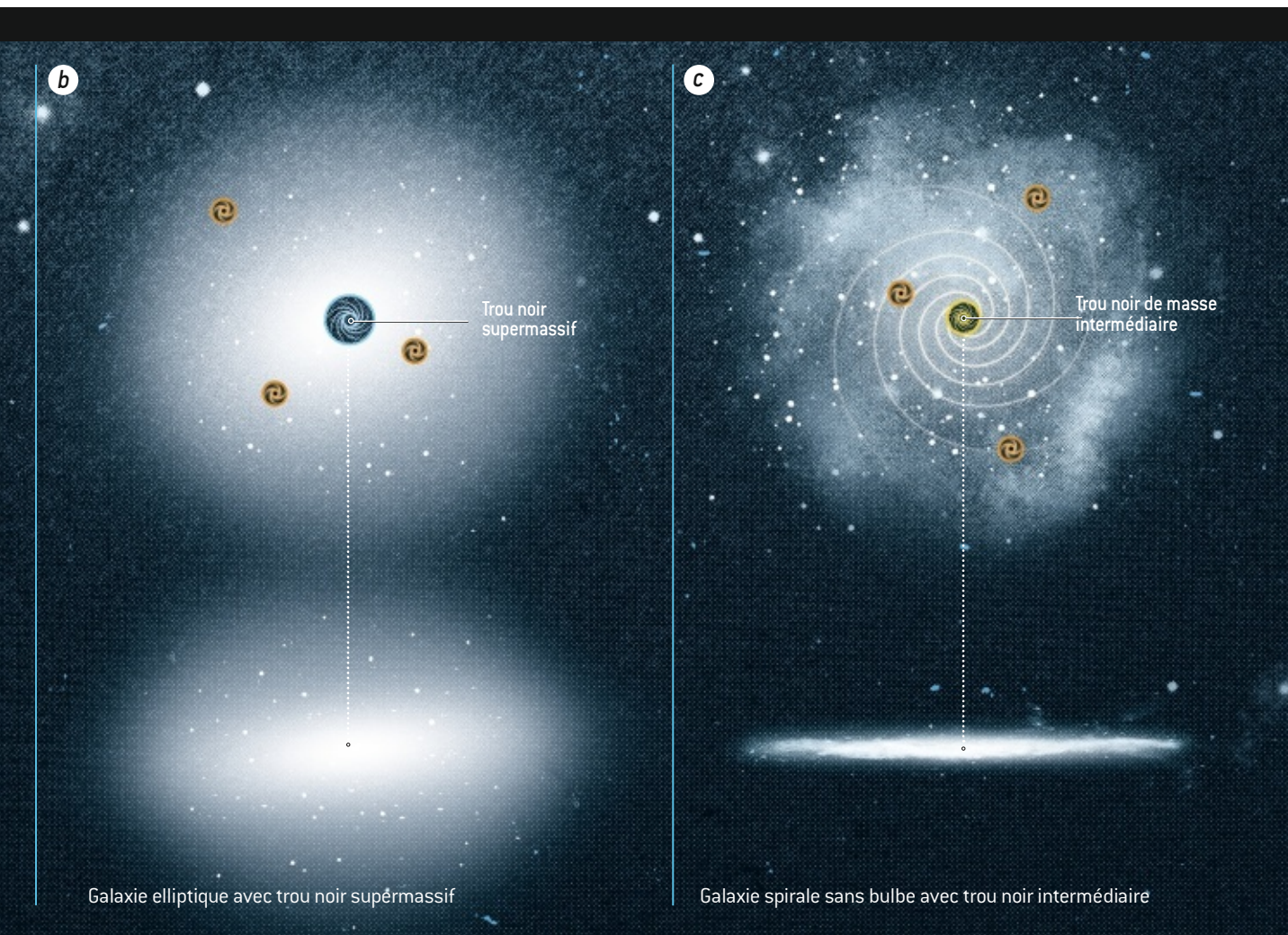




Gavin Paterina

360 000 masses solaires. Mais même avec cette technique, une incertitude d'un facteur trois subsiste, en raison des hypothèses faites pour le calcul.

La galaxie sans bulbe NGC 4395 semble ainsi abriter exactement le type de trou noir de masse intermédiaire que nous cherchions. Cependant, des 500 galaxies examinées par L. Ho, c'était la seule galaxie sans bulbe à présenter des signes clairs de la présence d'un trou noir actif. La deuxième a été trouvée en 2002.

Aaron Barth, alors à l'Institut de technologie de Californie, a utilisé le télescope *Keck II* de Hawaï pour obtenir le spectre d'une curieuse petite galaxie peu étudiée, POX 52. Comme NGC 4395, cette galaxie présentait des signes encourageants, sans pour autant avoir le profil type pour abriter un trou noir supermassif (c'est une galaxie d'un type rare, dit sphéroïdal, distinct des galaxies spirales à bulbe et elliptiques). Or le spec-

tre de POX 52 obtenu ressemble de façon frappante à celui de NGC 4395, et présente les mêmes caractéristiques qui trahissent la présence d'un trou noir !

POX 52 se trouve à 300 millions d'années-lumière, 20 fois plus loin que NGC 4395, si bien que l'estimation de la masse de son trou noir est encore moins facile. Cependant, divers indices convergent vers un trou noir d'environ 100 000 masses solaires. Les trous noirs intermédiaires dans les galaxies sans bulbe définissent dès lors une classe... contenant deux éléments !

Bien sûr, nous avons besoin de davantage de spécimens de trous noirs intermédiaires pour répondre à toute une série de questions. Quelle est leur fréquence ? Toutes les galaxies sans bulbe en contiennent-elles un, ou bien les galaxies de ce type sont-elles pour la plupart dépourvues de trou noir ? Trouve-t-on ailleurs des trous noirs intermédiaires ? Existe-t-il des spécimens encore plus petits ? Ce n'est qu'en

répondant à ces questions que nous comprendrons comment les germes des trous noirs supermassifs se sont formés, et quel rôle ils ont joué dans l'Univers jeune.

Malheureusement, les méthodes classiques sont peu propices à la détection de trous noirs intermédiaires actifs. Plus un trou noir est gros, plus il peut se nourrir et plus il brille. Les petits trous noirs sont peu lumineux et donc plus difficiles à déceler. Mais il y a pire. Les galaxies elliptiques, où les gros trous noirs ont tendance à se trouver, sont un environnement favorable à la détection : elles ne renferment pas beaucoup de gaz et ne produisent pas de nouvelles étoiles, ce qui offre une vue dégagée du centre galactique. À l'inverse, les galaxies spirales, où l'on soupçonne les trous noirs intermédiaires de se cacher, forment plus d'étoiles. Or le rayonnement énergétique des jeunes étoiles, combiné au gaz et à la poussière opaques, peuvent dissimuler le signal d'un trou noir actif.

Les astronomes ont repéré jusqu'à présent une centaine de trous noirs intermédiaires de moins de deux millions de masses solaires.

Pour surmonter ces obstacles, L. Ho et moi avons exploité à partir de 2004 un précieux catalogue astronomique nommé SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*). Depuis 2000, ce recensement a observé plus d'un quart du ciel et obtenu le spectre de millions d'étoiles et de galaxies individuelles.

Nous avons passé au peigne fin 200 000 spectres de galaxies du relevé SDSS, et avons repéré 19 nouvelles candidates semblables à NGC 4395, c'est-à-dire des petites galaxies abritant des trous noirs actifs de moins d'un million de masses solaires. Des recherches similaires effectuées ces dernières années sur des données plus récentes du catalogue SDSS ont porté le total à une quarantaine de trous noirs de moins d'un million de masses solaires, et plus d'une centaine juste au-dessus du million de masses solaires.

La méthode utilisée pour estimer ces masses est assez indirecte. Les spectres

lumineux du SDSS nous livrent la vitesse du gaz chaud en orbite autour du trou noir central. Pour calculer directement la masse du trou noir, il manque la taille de l'orbite. Néanmoins, en extrapolant aux petits trous noirs la relation entre la vitesse du gaz et la masse du trou noir (plus il est petit, plus le gaz est lent) observée sur les trous noirs actifs d'un million à un milliard de masses solaires, nous pouvons repérer nos candidats trous noirs intermédiaires dans les données du SDSS.

Éplucher le catalogue de spectres

Ces recherches ont confirmé ce que NGC 4395 et POX 52 suggéraient : il existe une vaste population de trous noirs de masse intermédiaire résidant dans les galaxies sans bulbe. Pour autant, ces trous noirs semblent très rares. Parmi les galaxies assez brillantes pour être étudiées dans le SDSS, seule une sur un millier présente des signes de la présence d'un trou noir de masse intermédiaire actif.

Cependant, les recherches menées à partir du catalogue SDSS pourraient passer à côté de nombreux trous noirs. En effet, elles exploitent uniquement le domaine visible du spectre lumineux, si bien que la poussière pourrait cacher de nombreux trous noirs à notre vue. Pour contourner ce problème, on peut observer en rayons X, en infrarouge moyen et en ondes radio, rayonnements qui traversent la poussière.

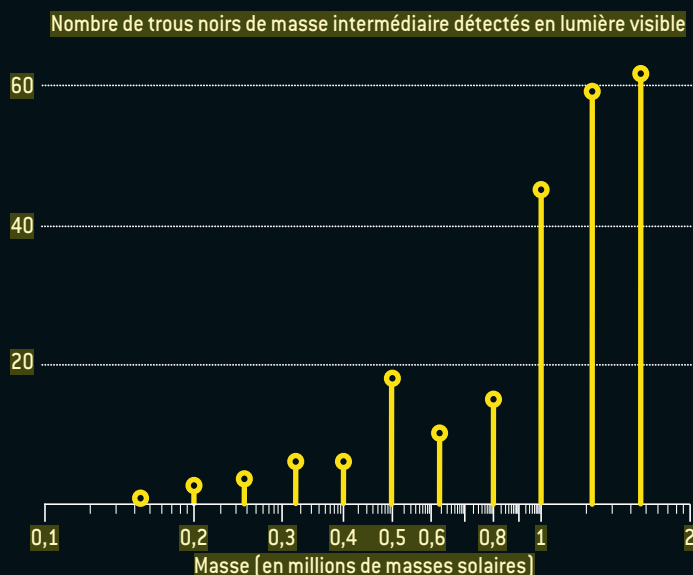
Shobita Satyapal, de l'Université George Mason, en Virginie, et ses collègues ont cherché en infrarouge moyen des trous noirs actifs dans les galaxies sans bulbe. Les rayons X émis par le gaz qui plonge dans le trou noir ionisent le gaz environnant, créant des raies spectrales caractéristiques, telle celle du néon fortement ionisé, dans l'infrarouge. Peu de galaxies se prêtent à ce genre de recherche, et l'équipe de S. Satyapal n'a découvert que quelques nouveaux trous noirs intermédiaires actifs. Les astronomes ont également vu, en rayons X et ondes radio, des signes de trous noirs intermédiaires potentiels ainsi que des petits trous noirs supermassifs. Des observations complémentaires sont en cours pour confirmer ces candidats.

Ces résultats indiquent que de nombreux trous noirs moyens cachés dans la poussière de leur galaxie échappent à la détection dans le domaine optique. Mais même en corrigeant ce biais, les trous noirs

L'EFFONDREMENT DIRECT PRIVILÉGIÉ

L'analyse du spectre en lumière visible de 500 000 galaxies a permis de découvrir plus d'une centaine de trous noirs ayant une masse estimée inférieure à deux millions de masses solaires (*ci-dessous*). D'autres études, s'appuyant sur l'infrarouge moyen, les rayons X et les ondes radio, ont mis en évidence des candidats trous noirs supplémentaires.

Il semble que la plupart des galaxies sans bulbe n'abritent pas de trou noir intermédiaire en leur cœur, mais que s'il y en a un, il est assez massif. Ces observations sont compatibles avec le scénario de formation des germes de trous noirs supermassifs par effondrement direct de nuage de gaz. Si ces germes résultaient d'effondrements stellaires, presque toutes ces galaxies devraient renfermer un trou noir d'au moins 10 000 masses solaires.



A New Sample of Low-Mass Black Holes in Active Galaxies, by Jenny Greene et Luis Ho, In *Astrophysical Journal*, Vol. 670, No. 1, November 20, 2007

intermédiaires semblent rares. Seuls 5 à 25 pour cent des galaxies sans bulbe abriteraient un trou noir de poids moyen suffisamment gros pour être détecté.

Les observations de trous noirs intermédiaires pourraient contribuer à expliquer la corrélation entre les gros trous noirs et les gros bulbes. Comme je l'ai évoqué précédemment, les trous noirs supermassifs dans les galaxies à gros bulbe représentent souvent un millième de la masse du bulbe. La croissance d'un trou noir supermassif semble intimement liée à celle du bulbe qui l'enserme. Si cette corrélation est valable dès la formation du bulbe, alors il ne devrait pas y avoir de corrélation entre les propriétés des galaxies sans bulbe et celles de leurs trous noirs intermédiaires.

Grandir au gré des collisions

L'une des principales théories proposées pour expliquer l'origine de cette étroite corrélation est la suivante : les galaxies elliptiques et les bulbes massifs se forment lorsque des galaxies spirales entrent en collision. Au cours de la fusion, les interactions gravitationnelles sèment la pagaille dans les disques, envoyant les étoiles dans tous les sens au sein d'une région sphérique (la future galaxie elliptique ou bulbe). Les nuages de gaz entrent en collision pendant la fusion et migrent vers le centre du bulbe sous l'effet de la gravité, déclenchant un sursaut de formation stellaire, ce qui augmente la masse stellaire du bulbe.

Dans le même temps, les trous noirs centraux de chaque galaxie fusionnent et absorbent une partie du gaz frais au centre de la galaxie. Bulbes et trous noirs supermassifs peuvent ainsi croître et évoluer de concert au fil des fusions de galaxies. Lorsque le trou noir atteint environ un millième de la masse du bulbe, son « souffle » l'emporte et repousse le gaz hors du centre galactique, mettant fin à la croissance.

Les trous noirs intermédiaires dans les galaxies sans bulbe, comme NGC 4395, n'auraient jamais profité des festins offerts par les fusions. Au lieu de cela, ces germes restants n'auraient grossi qu'au hasard d'encas de gaz croisés au centre de la galaxie, sans lien avec les fusions qui dirigent l'évolution d'ensemble de celle-ci. Certaines galaxies sans bulbe pourraient ne pas contenir de trou noir du tout. C'est le cas de la galaxie spirale « pure » M33 – très sem-



LA GALAXIE NGC 4395, une galaxie spirale sans bulbe, a été la première où l'on a découvert un trou noir central de masse intermédiaire.

blable par son apparence physique à NGC 4395 –, qui ne contient clairement aucun trou noir de plus de 1 500 masses solaires. Les indices s'accumulent en faveur de ce tableau liant la croissance des trous noirs à la formation du bulbe, mais de nombreux détails restent à élucider.

Quant à la question de la formation des germes de trous noirs, la rareté des trous noirs intermédiaires renforce la théorie de l'effondrement direct de nuages de gaz dans l'Univers précoce. Si l'effondrement stellaire rendait compte des premiers germes de trous noirs, presque toutes les galaxies sans bulbe devraient abriter des trous noirs d'au moins 10 000 masses solaires. Il semble cependant que les plus petites d'entre elles ne contiennent pas de trou noir.

D'autres indices sont aussi en faveur du scénario d'effondrement direct. En particulier, la faible corrélation des masses des trous noirs intermédiaires avec celles de leurs galaxies hôtes correspond mieux aux prédictions de ce scénario. Et il est bien plus facile d'aboutir à un trou noir d'un milliard de masses solaires en quelques millions d'années si les germes sont déjà très massifs au départ.

Bien sûr, de nouvelles données pourraient conduire à revoir cette conclusion. Par exemple, quand on pourra étudier des galaxies moins lumineuses que celles du relevé SDSS, la proportion de galaxies dotées de trous noirs intermédiaires pour-

rait augmenter ou baisser. Il est également possible que certaines galaxies abritent des trous noirs intermédiaires en dehors du centre galactique.

Beaucoup d'inconnues

Pour l'heure, de nombreuses questions concernant les trous noirs intermédiaires restent ouvertes. Sont-ils plus répandus dans certains types de petites galaxies ? De telles corrélations suggéreraient de nouveaux mécanismes d'interaction des trous noirs et de leurs galaxies hôtes avant les épisodes de fusion.

La plupart des galaxies sans bulbe sont-elles totalement dépourvues de trous noirs intermédiaires, ou ces derniers sont-ils simplement trop petits – de l'ordre d'un millier de masses solaires – pour être détectés pour l'instant ? De tels trous noirs seraient très certainement issus de l'effondrement d'étoiles. Ou encore, peut-être toutes les galaxies sans bulbe hébergent-elles un imposant trou noir intermédiaire – de 10 000 à 100 000 masses solaires –, mais qui serait la plupart du temps inactif, faute de gaz à engloutir ? Nous ne pourrions alors plus conclure que les trous noirs intermédiaires sont rares. Selon les réponses, les théories de formation des galaxies et des trous noirs supermassifs prendront des orientations radicalement différentes. ■