



Jenny GREENE est maître de conférences en astronomie à l'Université de Princeton, aux États-Unis.

✓ BIBLIOGRAPHIE

J. Greene, **Big black hole found in tiny galaxy**, *Nature*, vol. 470, pp. 45-46, 2011.

J. Kormendy *et al.*, **Supermassive black holes do not correlate with galaxy disks or pseudobulges**, *Nature*, vol. 469, pp. 374-376, 2011.

M. Volonteri, **Formation of supermassive black holes**, *Astronomy and Astrophysics Review*, vol. 18(3), pp. 279-315, 2010.

J. Laval, **Les trous noirs de masse intermédiaire**, *Pour la Science* n° 372, octobre 2008, http://bit.ly/372_lavalle.

J. Greene et L. Ho, **Active galactic nuclei with candidate intermediate-mass black holes**, *Astrophysical Journal*, vol. 610(2), pp. 722-736, 2004.

A. Filippenko et L. Ho, **A low-mass central black hole in the bulgeless Seyfert 1 galaxy NGC 4395**, *Astrophysical Journal*, vol. 588(1), pp. L13-L16, 2003.

étoiles qui se sont formées dans l'Univers étaient sans doute extrêmement massives comparées au Soleil et aux autres étoiles des générations suivantes. Le gaz primordial ne contenait en effet pas encore assez d'éléments lourds, qui facilitent le refroidissement et la formation de grumeaux plus petits lorsque les nuages de gaz se contractent. Les très grosses étoiles qui en auraient résulté se seraient consumées rapidement et auraient engendré des trous noirs d'une centaine de masses solaires. Mais comment faire grossir ces germes plus vite que par simple accréation ?

Dans un amas stellaire dense, où les étoiles les plus grosses (et les trous noirs) ont tendance à se regrouper près du centre, un trou noir central massif pourrait rapidement croître jusqu'à 10 000 masses solaires en avalant d'autres trous noirs, dépassant ainsi le rythme d'accréation limite habituel. La croissance jusqu'au stade de trou noir supermassif pourrait se poursuivre par une accréation plus ordinaire, peut-être avec d'autres trous noirs de belle taille au menu.

Cependant, la découverte des trous noirs supermassifs très précoces pose la question de savoir si cette phase initiale de croissance accélérée est suffisante. Les astrophysiciens ont ainsi cherché des mécanismes alternatifs engendrant des germes de trous noirs plus gros que ceux formés à la mort des étoiles primitives.

La distribution de masse des trous noirs indique leur origine

Pour ce faire, une possibilité est de sauter les étapes intermédiaires, à savoir les étoiles : un gros nuage de gaz s'effondrerait pour former directement un trou noir de 10 000 à 100 000 masses solaires, bien plus gros que celui issu d'une étoile. Ce processus offre, en théorie, davantage de latitude pour former des trous noirs supermassifs précoces. Ce type d'effondrement direct ne se produit plus dans l'Univers aujourd'hui, car la teneur en éléments lourds du gaz a beaucoup augmenté, mais les conditions étaient différentes dans sa jeunesse.

Malheureusement, il est difficile de déterminer lequel de ces deux scénarios correspond à la réalité, c'est-à-dire de savoir si les germes des trous noirs supermassifs étaient de taille stellaire, ou s'ils étaient issus de l'effondrement de gros nuages

interstellaires. Malgré les progrès des télescopes, on ne peut observer des « bébés trous noirs supermassifs » en train de commencer leur croissance dans les premiers âges de l'Univers. C'est pourquoi mes collègues et moi avons adopté une autre stratégie : chercher des germes qui, pour une raison ou une autre, auraient survécu jusqu'à nos jours sans devenir supermassifs.

Si les germes de trous noirs supermassifs étaient des résidus d'étoiles, nous devrions détecter de nombreux rescapés, à la fois au centre et à la périphérie des galaxies, car les étoiles primordiales défuntes devaient être réparties partout dans la Galaxie. Nous devrions aussi observer un éventail continu de masses allant de 100 à 100 000 masses solaires, car la croissance de ces germes serait susceptible d'avoir été interrompue, par manque de matériau à agréger, à n'importe quel stade de la croissance.

En revanche, si les amorces de trous noirs supermassifs se sont formées surtout par effondrement direct de nuages de gaz, alors il devrait y avoir assez peu de survivants : le processus d'effondrement direct doit être plus rare que les implosions d'étoiles. Au lieu d'un large éventail de masses, nous ne devrions trouver que des restes dépassant 100 000 masses solaires, la masse typique donnée par les modèles théoriques d'effondrement direct.

Avec d'autres chercheurs, j'ai donc entrepris de scruter le ciel à la recherche d'un nouveau type de trous noirs, qui ne seraient ni de masse stellaire ni supermassifs, mais entre les deux : les trous noirs de masse intermédiaire. Il s'agissait de voir si leur fréquence et leur distribution de masse s'accordent mieux avec le modèle de l'effondrement stellaire ou avec celui de l'effondrement gazeux. Quand nous nous sommes lancés dans cette entreprise il y a sept ans, elle ne semblait guère prometteuse. Un seul trou noir intermédiaire était connu, et il était considéré comme une anomalie. Mais depuis, nous en avons trouvé des centaines.

Dans la suite, j'inclurai dans la catégorie des trous noirs intermédiaires ceux dont la masse va de un millier à deux millions de masses solaires. Cette limite supérieure est un peu arbitraire, mais elle exclut les plus petits des trous noirs supermassifs connus, tel celui de notre Galaxie, qui dépasse à peine quatre millions de masses solaires. Dans tous les cas, la frontière est par nature floue. En pratique, la mesure

de la masse d'un trou noir est souvent très incertaine. Les masses de notre première série de trous noirs intermédiaires ont par exemple été revues à la hausse d'un facteur deux il y a quelques années, lorsqu'un des paramètres utilisés dans les calculs a été ajusté pour tenir compte de nouvelles données. Mais l'important est ce que nous allons découvrir dans les années à venir sur la population de trous noirs non supermassifs dans son ensemble, quelle que soit la façon dont on les définit. Ce que nous avons appris pour l'instant nous apporte déjà une vision nouvelle des interactions des trous noirs avec les galaxies qui les abritent.

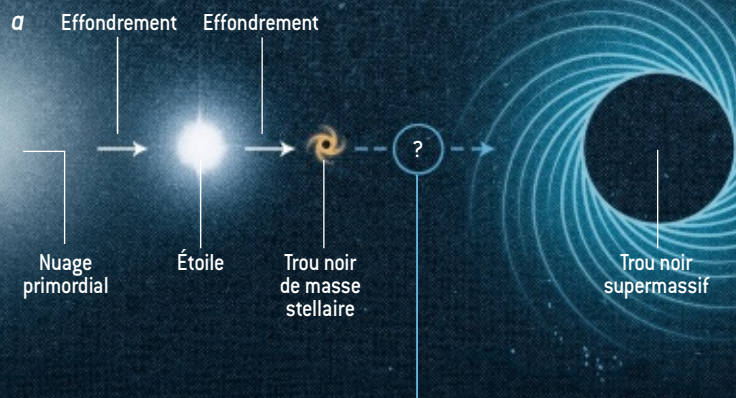
Où chercher les trous noirs intermédiaires ?

Les trous noirs peuvent être mis en évidence de diverses façons. Des étoiles qui tournent rapidement sur des orbites très serrées autour du centre d'une galaxie sont par exemple révélatrices de la présence d'un trou noir supermassif. Les trous noirs de masse intermédiaire sont cependant bien trop petits pour que leur influence gravitationnelle trahisse leur présence. C'est pourquoi nous nous concentrons sur les trous noirs « actifs » – qui sont en train d'engloutir du gaz – parce que le matériau brûlant du disque d'accrétion émet en tombant un rayonnement intense.

Au fil de plusieurs décennies d'études, les astronomes sont parvenus à la conclusion que les trous noirs actifs se trouvent en général dans de grosses galaxies d'un certain type. Les galaxies massives se divisent en deux grandes familles. Les galaxies spirales, telle la nôtre, arborent un vaste disque d'étoiles en rotation. À l'inverse, les galaxies elliptiques sont d'énormes agglomérations plus ou moins sphériques d'étoiles. Certaines galaxies spirales ont en leur centre un bulbe semblable à une galaxie elliptique en modèle réduit. Les trous noirs actifs se trouvent pour la plupart dans les galaxies elliptiques et dans les galaxies spirales dotées d'un bulbe massif. En outre, presque tous les bulbes galactiques assez proches pour être étudiés en détail abritent un trou noir de quelques millions à quelques milliards de masses solaires ! Enfin, plus le bulbe est gros, plus le trou noir central est gros : la masse du trou noir vaut généralement un millième de celle du bulbe. Cette surprenante corrélation est en soi une énigme passionnante. Elle

LES GERMES DE TROUS NOIRS GÉANTS

Des trous noirs monstrueux de plus d'un milliard de masses solaires existaient déjà dans la jeunesse de l'Univers. Selon la vision classique, ces trous noirs supermassifs ont grandi à partir de « germes », des trous noirs créés par l'effondrement d'une étoile. Cependant, un trou noir de masse stellaire ne peut pas grossir assez vite par simple accrétion de matière pour devenir supermassif en si peu de temps (a). Dès lors, comment des germes plus gros ont-ils pu se former ? Deux hypothèses s'affrontent : la croissance accélérée de trous noirs stellaires (b), et l'effondrement direct de nuages de gaz (c). La recherche des trous noirs vise à départager ces scénarios.



b Un gros trou noir de masse stellaire situé dans un amas d'étoiles pourrait rapidement atteindre 10 000 masses solaires en avalant d'autres trous noirs. Cette graine de masse intermédiaire pourrait ensuite devenir supermassive par accrétion du gaz.



c De façon alternative, un grand nuage de gaz primordial pourrait s'effondrer pour former directement un trou noir de masse intermédiaire, sans passer par l'étape « étoile ». Celui-ci grandirait ensuite également en se nourrissant de gaz.

