

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.

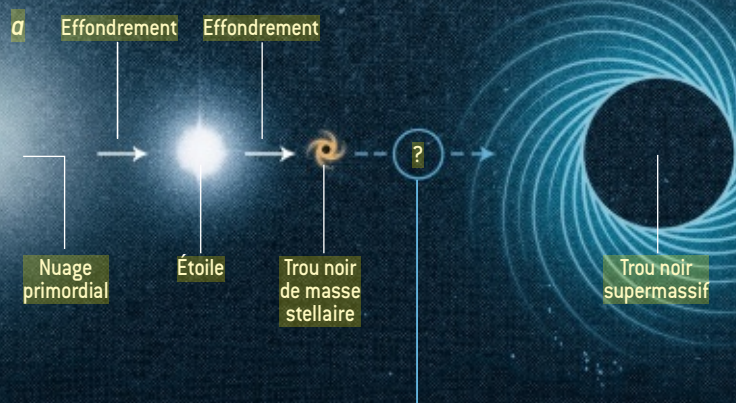
Où chercher les trous noirs intermédiaires ?

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

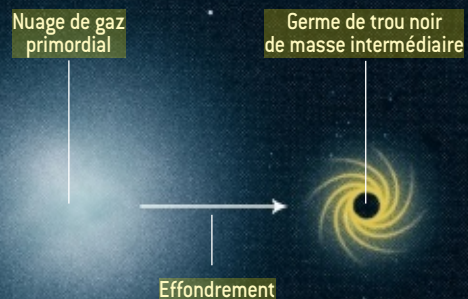
Des trous noirs monstrueux de plus d'un milliard de masses solaires existaient déjà dans la jeunesse de l'Univers. Selon la vision classique, ces trous noirs supermassifs ont grandi à partir de « germes », des trous noirs créés par l'effondrement d'une étoile. Cependant, un trou noir de masse stellaire 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.



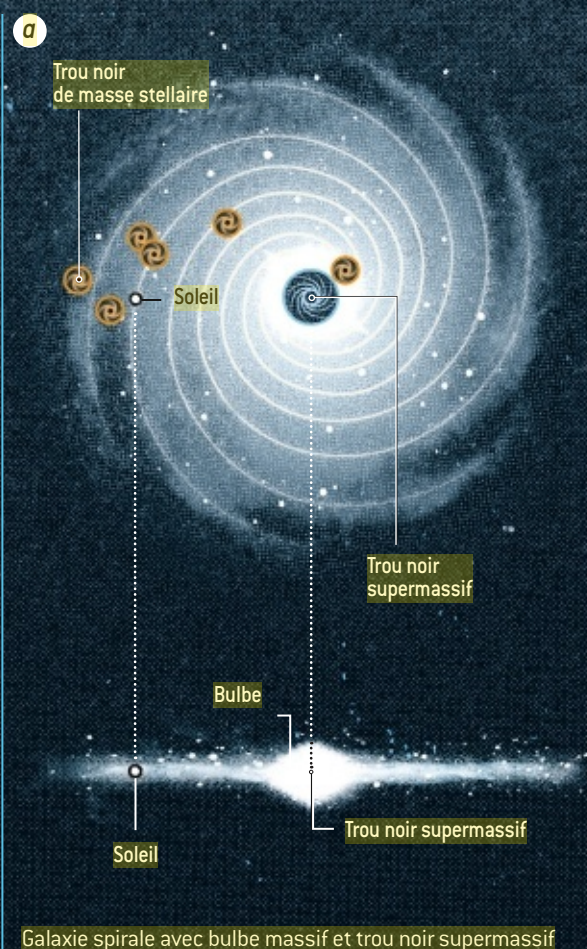
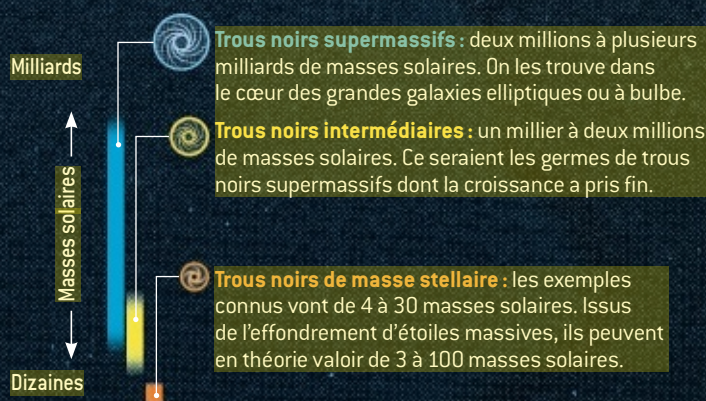
OÙ RÉSIDENT LES DIFFÉRENTS TYPES DE TROUS NOIRS

Il existe de nombreux types de galaxies, dont certains sont associés à la présence de trous noirs supermassifs. La Voie lactée *(a)* est une galaxie spirale, composée d'un disque et d'un gros renflement central dense en étoiles, ou bulbe. Elle abrite en son centre un trou noir supermassif de quatre millions de masses solaires *(en bleu)*. De nombreux trous noirs de masse stellaire *(en orange)* ont également été détectés dans la Voie lactée.

Les galaxies à bulbe et les grandes galaxies elliptiques *(b)* semblent toutes abriter un trou noir supermassif central. À l'inverse, les trous noirs de masse intermédiaire *(échelle ci-dessous, en jaune)* sont plus fréquents dans les galaxies dépourvues de bulbe massif, comme les spirales sans bulbe *(c)*.

Les classes de trous noirs

Les trous noirs connus se répartissent en trois familles, selon leur masse.



implique que les galaxies et les trous noirs supermassifs évoluent ensemble, par des mécanismes qui restent à élucider. De façon plus prosaïque, cette corrélation suggère qu'il faut rechercher les trous noirs intermédiaires dans les galaxies les plus petites. Mais lesquelles ?

Une curieuse petite galaxie nous a donné une idée. Mon directeur de thèse, Luis Ho, de l'Observatoire Carnegie, en Californie, a étudié environ 500 des galaxies brillantes les plus proches en 1995. Il avait constaté que si la plupart des galaxies à gros bulbe abritent des trous noirs actifs, ce n'est pas le cas pour les galaxies sans bulbe, à une exception près : NGC 4395, une galaxie spirale dotée d'un trou noir central actif et dépourvue de tout bulbe. Cette bizarrerie était en fait connue depuis 1989, mais considérée comme une anomalie. À l'exception de NGC 4395, le relevé de L. Ho confirmait la règle générale : on ne trouve pas de trous noirs dans les galaxies sans bulbe.

L'estimation de la masse du trou noir de NGC 4395 est particulièrement malaisée. Les mesures de masse les plus directes en astronomie passent par l'observation du mouvement orbital. La période d'une planète et la taille de son orbite autour du Soleil permettent par exemple de déduire la masse de ce dernier. De même, les orbites des étoiles dans une galaxie peuvent révéler la masse du trou noir central, s'il est suffisamment gros pour que l'on puisse distinguer les effets de sa gravité du mouvement d'ensemble des étoiles. Malheureusement, le trou noir de NGC 4395 est trop petit pour cela.

On doit donc exploiter des indices moins directs. Par exemple, le rayonnement X émis par les trous noirs actifs change d'intensité avec le temps, et plus le trou noir est gros, plus ces variations sont lentes. En 2003, David Shih et ses collègues, à l'Université de Cambridge, ont trouvé que l'intensité du rayonnement X émanant de NGC 4395 varie

si vite que la masse du trou noir doit être comprise entre 10 000 et 100 000 masses solaires. Au même moment, L. Ho est arrivé à peu près à la même fourchette de masse en s'appuyant sur d'autres indices.

Des masses difficiles à estimer

Bradley Peterson, de l'Université de l'Ohio, et ses collègues ont effectué en 2005 une mesure un peu plus directe. Ils ont utilisé, à l'aide du télescope spatial *Hubble*, une technique dite de cartographie par réverbération. La réverbération des bouffées de lumière émises par le trou noir sur les nuages de gaz interstellaires proches permet de déterminer leur position et leur vitesse, et donc leurs orbites autour du trou noir central, donnant ainsi accès à la masse de celui-ci. B. Peterson et ses collègues ont ainsi estimé que le trou noir de NGC 4395 représente environ