

incertains et nul ne peut dire avec certitude si le Nouvel Empire a commencé en l'an 1540 ou cinq ans plus tôt !

Avec la XII^e dynastie, à laquelle appartenait Sésostri III, nous foulons à nouveau un sol ferme ; cette dynastie a duré 182 ans. En fonction de la durée de la Deuxième Période intermédiaire, elle a donc dû commencer entre 2000 et 1975.

Le Moyen Empire fut précédé par une période où l'Égypte comptait de petits États : la Première Période intermédiaire. Au sein de cette époque, les 185 années citées par le prêtre Manéthon pour les règnes des rois d'Hérakleopolis (le plus important royaume de cette phase intermédiaire) jusqu'à la réunification, à la fin de la XI^e dynastie (entre 2040 et 2020), semblent pouvoir correspondre à la vérité. Les dates relatives aux fonctionnaires régionaux ainsi que les découvertes archéologiques dans les nécropoles de la Première Période intermédiaire correspondent à une durée d'environ 200 ans.

L'Ancien Empire s'est terminé vers l'an 2230, ce qui nous amène à l'ère des constructeurs de pyramide connus. Le

plus gros problème chronologique pour cette période est le système de dates alors utilisé. En effet, à partir de la XI^e dynastie, les Égyptiens ont daté les événements en fonction du début du règne des souverains ; auparavant, on mentionnait les « années de recensement des troupeaux », c'est-à-dire les années de levée d'impôts. Les spécialistes ont longtemps pensé que ces levées étaient séparées de deux ans, car à côté de la mention « année du recensement », on trouve aussi de temps en temps une mention « année après le recensement ». Entre-temps, il est devenu clair que soit les Égyptiens n'avaient pas de méthode régulière de prélèvement des impôts, soit nous ne l'avons pas encore comprise.

A posteriori, les listes de rois des époques tardives n'aident pas, car leurs auteurs, manifestement, ont aussi confondu ces données avec des années de règne. Les constructeurs des grandes pyramides de la IV^e dynastie, les rois Snéfrou, Khéops et Chéphren, ont sans doute régné bien plus longtemps que ne le rapportent les chroniqueurs égyptiens, à

en croire les estimations récentes des durées de construction.

Le calcul à rebours fondé sur les dates de recensement des troupeaux depuis la Première Période intermédiaire jusqu'à l'Ancien Empire et sur toute une série d'autres indices comporte donc de très grandes incertitudes. Il conduit à placer la construction de la pyramide de Khéops au XXVI^e siècle.

L'histoire complétée par la physique

C'est là qu'intervient la physique : une équipe internationale vient en effet de faire savoir que les dates obtenues par la méthode du radiocarbone coïncident bien avec le résultat de la reconstruction de la chronologie par la méthode historique (voir *L'Égypte ancienne à l'aune du radiocarbone*, page 20). Ces datations physiques fixent surtout les plus anciennes périodes de l'histoire égyptienne, pour lesquelles la méthode astronomique est controversée ; elles complètent ainsi idéalement la chronologie historique. ■



Muséum national d'Histoire naturelle

L'extinction d'espèce Histoire d'un concept & enjeux éthiques

Julien Delord

« Durant les neuf derniers millénaires, l'humanité s'est conduite en tant qu'espèce pionnière invasive. Cette espèce est individualiste, agressive et envahissante. Elle tente d'exterminer ou de supprimer d'autres espèces ». Et en toute inconscience, pourrait-on ajouter au constat implacable du philosophe Arne Naess ! Comment cet événement écologique massif, cette destruction inconsidérée de nos espèces-sœurs a pu rester si longtemps invisible et demeurer si obstinément impensée ? À moins que les tentatives de reconnaissance et de formalisation de ce phénomène ne se soient heurtées à des résistances d'ordre théologique, scientifique et culturelle profondément ancrées... Mais alors, comment s'assurer que cette « sixième extinction de masse », en tant que conséquence (éco-) logique du développement de l'espèce humaine, peut légitimement faire l'objet d'une condamnation morale ? Sur quelles bases éthiques fonder la conservation des espèces et proposer une norme de vie commune au sein de l'odyssée de l'évolution ? C'est en réponse à ces questionnements essentiels où s'entrecroisent les perspectives millénaires de l'histoire environnementale des civilisations humaines et l'urgence de la crise de la biodiversité contemporaine que ce livre suggère nombre d'éclaircissements historiques et philosophiques à même de nourrir une indispensable réflexion écologique.



ISBN 978-2-85653-656-8
170 x 240 mm • 140 figures quadri
692 p. • 45 € TTC • novembre 2010

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications Scientifiques

Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr • <http://www.mnhn.fr/pubsci>

Histoire des sciences

Astrophysique

À la recherche des **TROUS NOIRS** de masse

Jenny Greene

Pesant moins d'un million de masses solaires,
les trous noirs de masse intermédiaire
pourraient être la clef de l'énigme
de la formation de leurs homologues
supermassifs et des galaxies
qui les abritent.

intermédiaire

L'ESSENTIEL

✓ Moins d'un milliard d'années après le Big Bang, il existait déjà des trous noirs supermassifs d'un milliard de masses solaires. Or l'accrétion de matière ne suffit pas à expliquer une croissance aussi rapide.

✓ Ces monstres sont-ils issus de l'effondrement d'étoiles en de nombreux petits trous noirs, qui ont ensuite grossi et fusionné ? Ou bien ont-ils évolué à partir de germes déjà massifs, résultant de l'effondrement de grands nuages de gaz primordiaux ?

✓ La réponse viendra de la détection et de l'étude des trous noirs de masse intermédiaire. Les premiers résultats favorisent le scénario de l'effondrement de nuages de gaz.

Les astronomes savent depuis une dizaine d'années que presque toutes les grosses galaxies recèlent en leur centre un gigantesque trou noir – astre dont le champ de gravité est si intense que la lumière ne peut s'en échapper. En mourant, les étoiles peuvent s'effondrer en petits trous noirs, dont la masse va de trois à quelques dizaines de fois celle du Soleil. Ces trous noirs de masse stellaire sont cependant minuscules comparés aux monstres présents au cœur des galaxies, qui atteignent des millions, voire des milliards, de masses solaires.

Ces trous noirs supermassifs posent nombre de questions : pourquoi sont-ils si fréquents dans les galaxies ? Qui apparaît en premier, le trou noir central ou sa galaxie hôte ? Comment se sont-ils formés et ont-ils grandi ?

Le mystère est d'autant plus grand que des trous noirs supermassifs existaient déjà alors que l'Univers était encore très jeune. En juin 2011, un trou noir de deux milliards de masses solaires environ a été observé à une distance correspondant à 770 millions d'années après le Big Bang. Comment a-t-il pu devenir si massif en si peu de temps ?

Une croissance aussi rapide est étonnante, car les trous noirs, surtout connus dans l'imaginaire collectif pour aspirer le gaz et les étoiles qui passent à leur portée, sont aussi très efficaces pour « souffler » la matière environnante. Le gaz qui tombe sur un trou noir se met à tourner au sein d'un énorme disque, le disque d'accrétion. Échauffé par les frottements, en particulier à l'approche du point de non-retour sur le bord interne du disque, le gaz rayonne de façon intense, notamment en rayons X. Ce rayonnement repousse le reste de la matière en chute sur le trou noir, ce qui limite le rythme de croissance de l'astre par accrétion.

Les calculs indiquent qu'un trou noir qui accumule de la matière en continu au rythme le plus rapide possible double de masse tous les 50 millions d'années. C'est impressionnant, mais trop lent pour qu'un trou noir de masse stellaire devienne un monstre d'un milliard de masses solaires en moins d'un milliard d'années !

Les astrophysiciens ont proposé deux scénarios généraux de formation des trous noirs supermassifs. Le premier, avancé il y a déjà de nombreuses années, suppose que leurs germes étaient de gros trous noirs, vestiges d'étoiles défuntes. Les premières



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 défuntées 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.

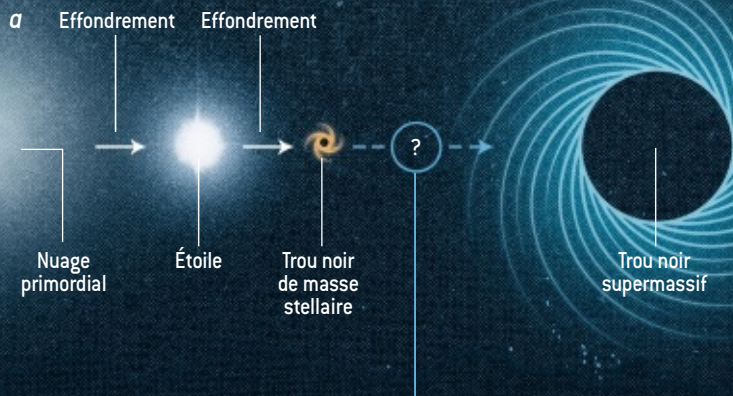
Où chercher les trous noirs intermédiaires ?

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.



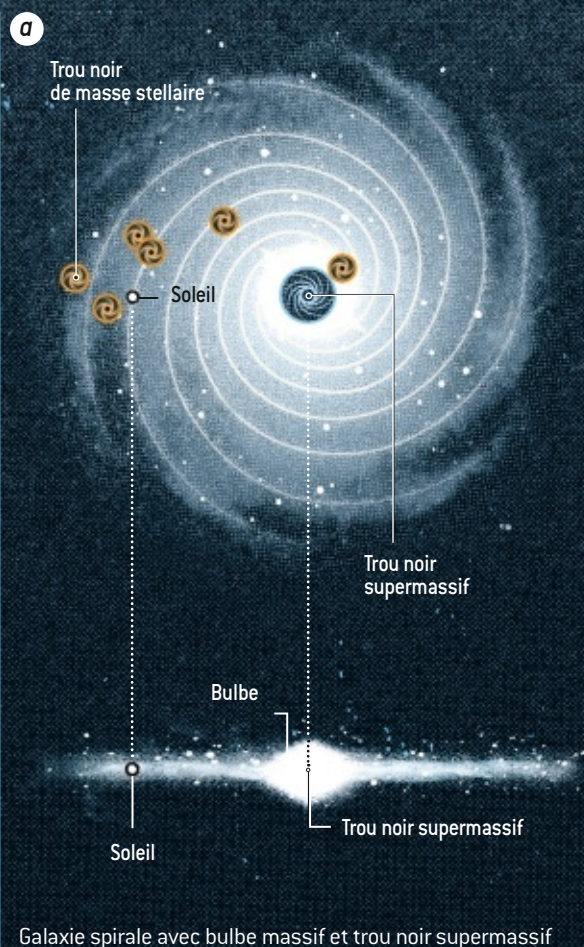
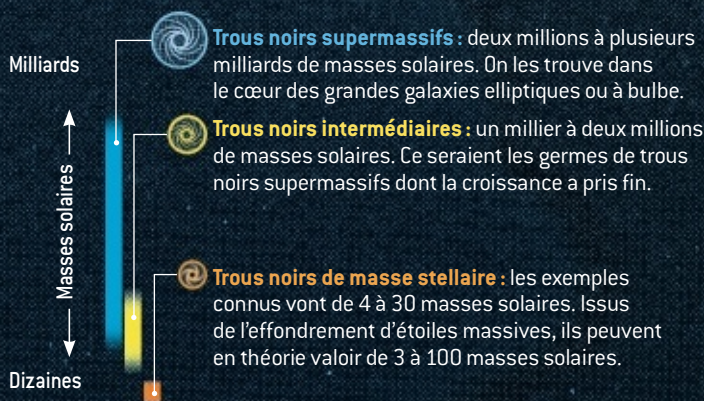
OÙ RÉSIDENT LES DIFFÉRENTS TYPES DE TROUS NOIRS

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.



Galaxie spirale avec bulbe massif et trou noir supermassif

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.

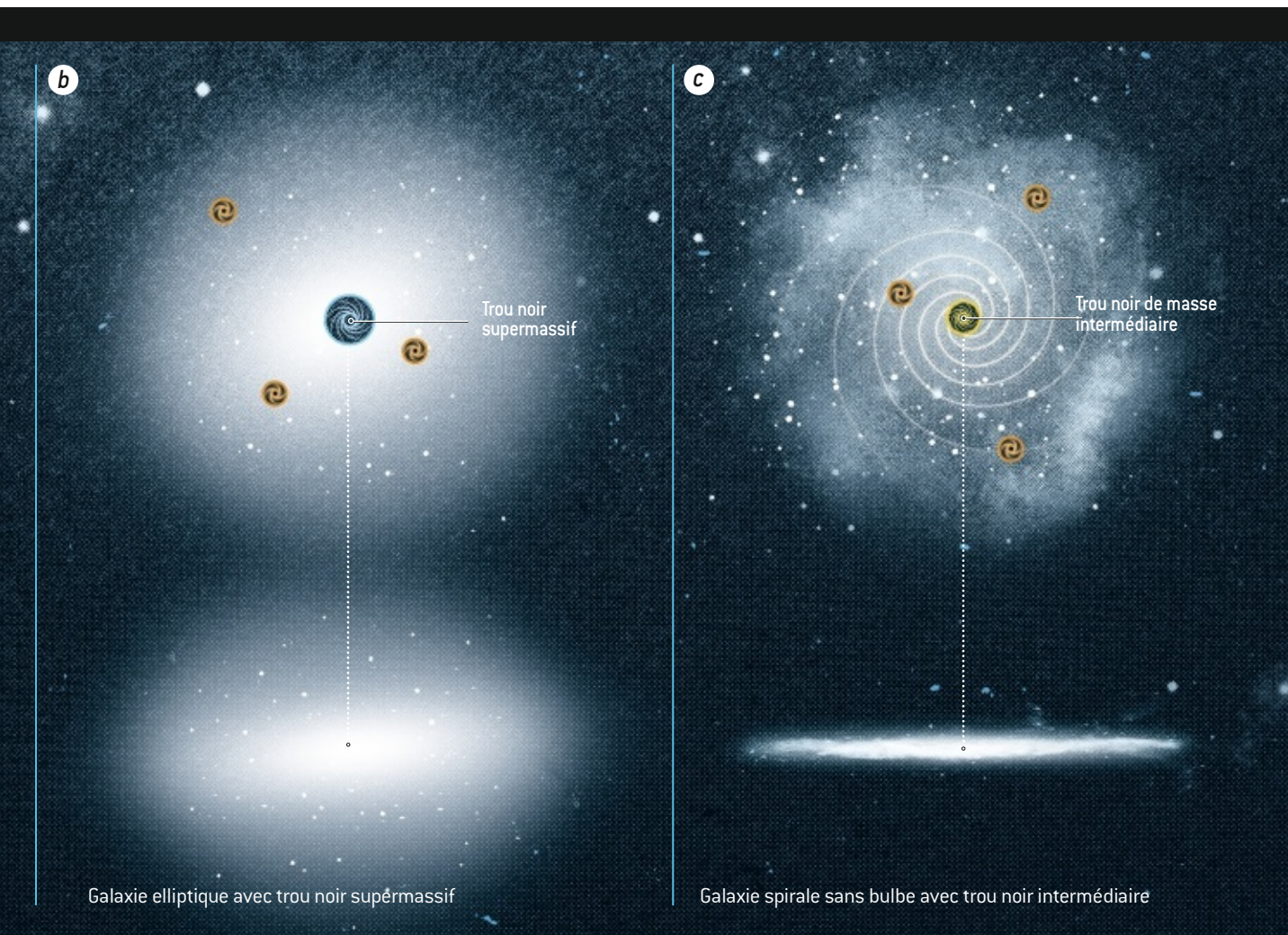
L'estimation de la masse du trou noir de NGC 4395 est particulièrement malaisée. Les mesures de masse les plus directes en astronomie passent par l'observation du mouvement orbital. La période d'une planète et la taille de son orbite autour du Soleil permettent par exemple de déduire la masse de ce dernier. 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



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.

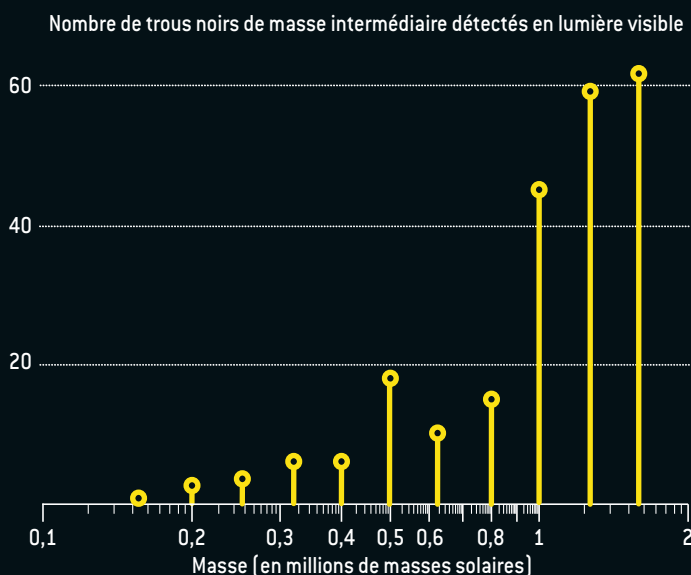
Shobita Satyapal, de l'Université George Mason, en Virginie, et ses collègues ont cherché en infrarouge moyen des trous noirs actifs dans les galaxies sans bulbe. Les rayons X émis par le gaz qui plonge dans le trou noir ionisent le gaz environnant, créant des raies spectrales caractéristiques, telle 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. ■



1. LES TOXINES BOTULIQUES

sont produites par *Clostridium botulinum*, des bactéries en forme de bâtonnets (tels ceux représentés sur cette vue d'artiste).

Dans un environnement stressant, la bactérie forme une structure résistante – la spore – qui ne se multiplie plus.

La spore germe à nouveau quand l'environnement devient favorable, colonise le lieu (un aliment ou directement la flore intestinale) et excrète les toxines.

César Mattei et Frédéric Meunier

L'étude des mécanismes d'action des toxines botuliques, responsables d'une maladie grave, le botulisme, a permis la mise au point de traitements de certaines maladies neuromusculaires.

Toxines poison et

Durant l'été 2011, plusieurs personnes ont été victimes d'une intoxication alimentaire après avoir consommé des tapenades artisanales achetées dans le Sud de la France. Ces produits en conserve étaient contaminés par les plus puissantes toxines du règne vivant : les toxines botuliques. Ces toxines sont synthétisées par une bactérie anaérobie, *Clostridium botulinum*. L'ingestion de cette bactérie présente dans certains aliments peut entraîner une infection alimentaire complexe, le botulisme, qui doit son nom au latin *botulus* (boudin) – l'une des premières descriptions de la maladie, à la fin du XVIII^e siècle en Allemagne, ayant identifié des saucisses comme agent contaminant. Les documents historiques sur les intoxications alimentaires sont rares avant le XVIII^e siècle, mais on sait qu'au X^e siècle, l'empereur byzantin Léon VI interdit

la fabrication de boudin, sans doute suite à une intoxication de type botulisme.

Des toxines du système nerveux

D'un côté responsables d'intoxications alimentaires graves et considérées comme une arme biologique potentielle, ces molécules naturelles sont également utilisées en médecine, et ce, dans un nombre croissant d'indications thérapeutiques. La description des mécanismes d'action de ces toxines à l'échelle cellulaire a beaucoup progressé et devrait permettre de développer encore leur utilisation thérapeutique tout en limitant leurs effets secondaires. C'est cette dualité des toxines botuliques que nous examinerons ici, de la maladie qui les fit connaître aux traitements qu'elles fournissent. Nous verrons comment

maladie et traitements reposent sur un même principe : la paralysie flasque des muscles. Mais, tout d'abord, qu'est-ce qu'une toxine ?

Du grec *toxicon* (poison recouvrant les flèches), une toxine est une biomolécule létale à faible concentration, qui confère un pouvoir paralysant à l'organisme qui la sécrète. On en trouve partout. Dans le règne animal, les toxines sont les constituants majeurs des venins : scorpions, serpents, araignées, cônes, insectes, amphibiens, et bien d'autres, utilisent les toxines dans des stratégies de prédation ou de défense contre un adversaire. Les espèces animales ont évolué en fonction de leur environnement, parfois en synthétisant des toxines, dans une sorte de course à l'armement biologique entre espèces concurrentes. Les végétaux sécrètent aussi des toxines, qu'ils utilisent souvent pour repous-