

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-