

Les trous noirs

acteurs dans la naissance et la vie des galaxies

Lorraine Braibant

Galaxie, c'est-à-dire ?

Les galaxies sont de gigantesques ensembles d'étoiles, de gaz et de poussière (et de matière sous d'autres formes plus exotiques, par exemple des étoiles à neutrons et des trous noirs) liés par la gravitation. Ces géantes de l'espace présentent de larges variétés de tailles, de masses et de brillances. Les plus petites galaxies, dites galaxies naines, contiennent typiquement quelques millions d'étoiles tandis que les galaxies les plus massives en comportent plusieurs centaines de milliards !

Les galaxies exhibent également des morphologies diverses. Les galaxies massives peuvent en particulier être classées, suivant leur aspect, en deux grandes catégories : les galaxies elliptiques et les galaxies spirales. Comme leur nom l'indique, les galaxies elliptiques (Illustration 1) ont une forme ellipsoïdale tridimensionnelle, une façon élégante de dire qu'elles ont une forme semblable à celle d'une (colossale) pastèque. Les galaxies spirales (Illustrations 2 et 3) sont, en revanche, aplaties. Leurs longs bras en forme de spirale se trouvent tous dans un même plan de telle sorte que ces galaxies ressemblent, grosso modo, à des disques. Bien que leur morphologie soit la différence la plus visible entre galaxies elliptiques et galaxies spirales, ces deux espèces de galaxies diffèrent aussi suivant d'autres aspects plus subtils, tels les étoiles qui les composent ou leur contenu en gaz et en poussières. En effet, les étoiles qui constituent les galaxies elliptiques sont des étoiles vieillissantes, nées il y a plusieurs millions d'années, alors que les galaxies

1. – La galaxie elliptique M87, membre de l'amas de la Vierge. Les galaxies elliptiques ont une forme semblable à celle d'une pastèque. Elles sont peuplées de vieilles étoiles et dépourvues de gaz et de poussière.

(© Canada-France-Hawaii Telescope, J.-C. Cuillandre)



2. – La galaxie spirale vue de profil, ESO 121-6, qui se trouve dans la constellation du Peintre. Les galaxies spirales ressemblent à des disques plats riches en gaz et en poussière et contenant des étoiles jeunes.
(© Hubble Space Telescope)

spiraux contiennent de jeunes étoiles et voient même naître de nouvelles étoiles en leur sein. De plus, les galaxies elliptiques sont en général dépourvues de gaz et de poussière (du moins, elles en contiennent très peu), gaz et poussière dont sont par contre riches les galaxies spirales. Par ailleurs, la plupart des galaxies spirales possèdent en leur centre un composant ellipsoïdal dense et renfermant des

étoiles plus âgées, semblable à une galaxie elliptique miniature, appelé *bulbe*.

En réalité, les formes diverses et variées que les galaxies offrent au regard de leurs admirateurs ne se répartissent pas simplement en deux familles bien définies. Outre ces deux classes de galaxies, il existe effectivement des objets intermédiaires, comme les galaxies lenticulaires, sorte d'hybrides entre les galaxies elliptiques et les spirales (Illustration 4). De même que les galaxies spirales, ces galaxies lenticulaires ont l'aspect d'un disque mais elles ne montrent aucune structure spirale, sont pauvres en gaz et en poussières et sont essentiellement peuplées de vieilles étoiles, or ces dernières caractéristiques sont distinctives

3. – La galaxie spirale M81 située dans la constellation de la Grande Ourse. Les galaxies spirales tiennent leur nom de la structure de leurs bras. Les bras spiraux doivent leur couleur bleutée aux jeunes étoiles qui les composent. Les galaxies spirales ont aussi en leur centre un bulbe (sorte de mini galaxie elliptique) qui renferme des étoiles vieillissantes.
(© Hubble Space Telescope).

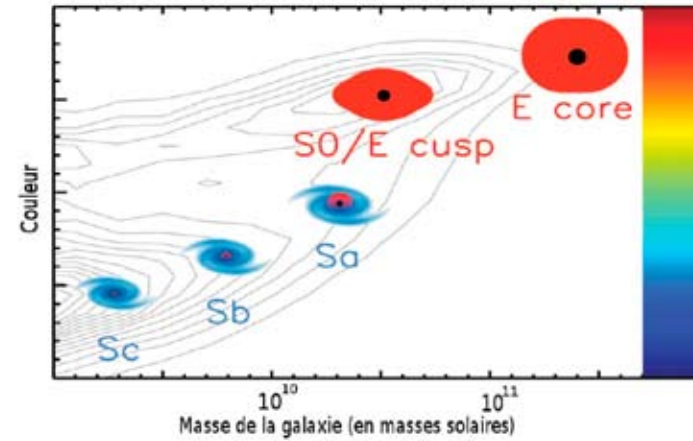
des galaxies elliptiques. Les astronomes ont défini une dernière famille « fourre-tout » de galaxies, les galaxies irrégulières, qui inclut toutes les galaxies dont la morphologie n'a

pu être classée dans l'une des trois catégories définies plus haut.

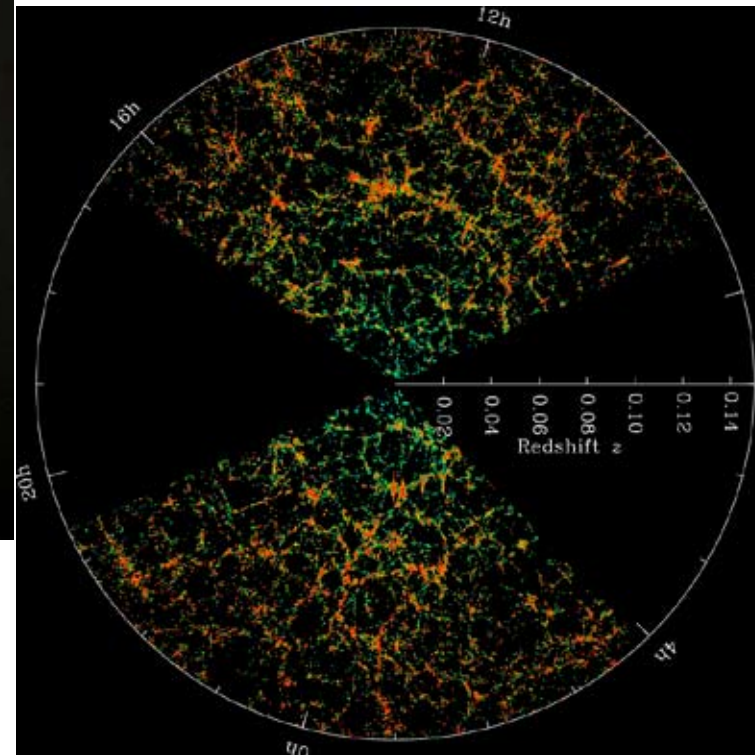
Un fait intéressant émerge lorsqu'on étudie la couleur des galaxies : les galaxies elliptiques sont typiquement rouges et les galaxies spirales bleues (voir Illustration 5). Les galaxies spirales ont une couleur plus bleue à cause des étoiles plus jeunes qui les peuplent. Les galaxies spirales contiennent en effet des nuages de gaz froid servant de berceaux aux étoiles. Des étoiles de toutes masses, petites et grosses, se forment à partir du gaz qui compose ces nuages. Les étoiles massives émettent une lumière plus bleue alors que les étoiles de plus faible masse irradient une lumière plus rouge. Ces étoiles massives vivent



4. – La galaxie lenticulaire NGC 2787. Les galaxies lenticulaires ont une forme de disque caractéristique des galaxies spirales mais sont composées de vieilles étoiles et sont pauvres en gaz et en poussières comme les galaxies elliptiques.
(© Hubble Space Telescope)



5. – Les galaxies spirales se situent préférentiellement dans la zone du diagramme associée à la couleur bleue tandis que les galaxies elliptiques sont de couleur rouge. Les galaxies spirales paraissent plus bleues en raison des étoiles plus jeunes qui les composent.
(Cattaneo et al., Nature, Vol. 460, 2009)



6. – Cartographier l'univers est l'objectif du programme Sloan Digital Sky Survey. La structure à grande échelle de l'univers se révèle être une toile d'araignée cosmique où la matière se concentre sous forme de filaments. À l'aube de l'univers, ces filaments ont alimenté en gaz frais les galaxies naissantes.
(© Sloan Digital Sky Survey – www.sdss.org)



7. – NGC 2207 – la fusion de deux galaxies spirales conduit à la formation d'une galaxie elliptique. Lorsque les gaz contenus dans ces galaxies entrent en collision, ils sont comprimés. Cette compression peut déclencher une flambée de formation d'étoiles (autrement dit la formation de nombreuses nouvelles étoiles).
(© ESO)

nettement moins longtemps que les étoiles de faible masse. Ce faisant, lorsqu'une population d'étoiles vieillit, les « étoiles bleues » meurent bien avant que les « étoiles rouges » ne s'éteignent. Au total, la lumière émise par un groupe d'étoiles, nées en même temps, en cours de vieillissement, deviendra de plus en plus rougeâtre. Les galaxies elliptiques dont les étoiles sont suffisamment âgées pour que toutes les étoiles massives bleutées aient disparu et qui, contrairement aux galaxies spirales, ne possèdent plus assez de gaz pour en fabriquer de nouvelles, apparaissent par conséquent plus rouges.

La naissance des galaxies

Lors des premiers stades de leur existence, les galaxies primitives sont assez différentes des galaxies telles que nous les connaissons. Selon Avishai Deke¹ et son équipe, qui ont proposé en 2009 un nouveau modèle de formation des galaxies, ces galaxies primordiales « ressemblent à de grands disques de gaz fragmentés en plusieurs grumeaux géants, au sein desquels les étoiles se forment activement ». Ces disques galactiques primordiaux croissent en accumulant du gaz qui s'écoule jusqu'à eux en courants froids, depuis les filaments de matière qui emplissent l'univers et forment la structure à grande échelle de celui-ci (voir Illustration 6). Ces écoulements de gaz froid peuvent être fluides ou transporter de nombreux grumeaux (c'est-à-dire de « paquets » de gaz plus denses).

Un écoulement fluide enrichira le disque galactique primitif en gaz frais, lui permettant de croître et de se fragmenter en agglomérats massifs, capables de fabriquer un grand nombre d'étoiles en leur sein. En revanche, lorsque des grumeaux sont présents dans l'écoulement qui nourrit la galaxie en construction, ils contribuent exclusivement à la formation d'un bulbe ellipsoïdal qui deviendra finalement le

composant dominant de la galaxie. Ce bulbe de plus en plus massif stabilise le disque primordial et l'empêche de se fragmenter. Ainsi, la formation de gros agglomérats à partir de ce disque est inhibée et, par là même, la naissance d'étoiles neuves. En conclusion, d'après ce modèle, des galaxies de différentes variétés se formeront suivant la nature (et plus particulièrement la fluidité) des écoulements de gaz froid qui alimentent les disques galactiques primitifs.

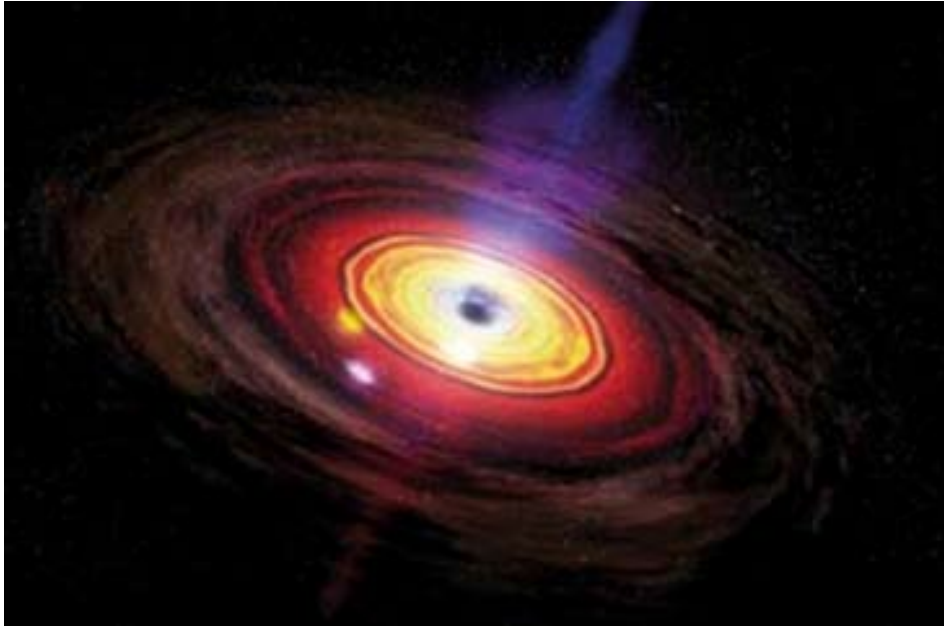
Au bout d'un certain temps, le gaz cesse de s'accumuler sur ces galaxies primitives. L'unique possibilité pour ces galaxies de grandir encore, lorsque leur source d'alimentation en matériau frais s'est tarie, est la collision et la fusion de deux galaxies (Illustration 7). Non seulement ce titanesque choc conduit irrévérablement à la formation d'une galaxie (plus elliptique (permettant par exemple de « transformer » deux galaxies spirales qui entrent en collision en une galaxie elliptique), mais il peut également engendrer une flambée de formation d'étoiles suite à la collision des gaz encore contenus dans les galaxies en interaction. Ces gaz qui entrent en collision sont en effet comprimés et cette compression crée des conditions propices à la fabrication de nouvelles étoiles à partir de ce gaz plus dense.

Que viennent faire les trous noirs dans cette histoire ?

Les astronomes ont découvert d'énormes trous noirs au centre de toutes les galaxies massives qui ont été observées avec suffisamment de détails, y compris dans notre propre galaxie. Vu leur masse gargantuesque, fluctuant typiquement entre plusieurs millions et plusieurs milliards de fois la masse de notre Soleil, ces trous noirs sont qualifiés de *supermassifs*. Les scientifiques pensent qu'un trou noir supermassif se trouverait au centre de chaque bulbe². Il existe une connexion ma-

¹ <http://www.cea.fr/le-cea/actualites/nouvelle-theorie-sur-formation-des-galaxies-16900>

² Le terme bulbe est ici (et dans le reste de cet exposé, sauf mention contraire) utilisé pour désigner à la fois



8. – Vue d'artiste de l'intérieur d'un noyau actif de galaxie. Le gaz spirale jusqu'au trou noir supermassif en formant un disque avant d'y être englouti. À proximité du trou noir, le gaz s'échauffe et émet de la lumière. Des jets de particules très énergétiques sont aussi propulsés depuis le voisinage du trou noir.

nifeste entre ces trous noirs et les galaxies qui les abritent. En premier lieu, la masse du trou noir est systématiquement égale à (environ) un millième de la masse du bulbe qui l'héberge. Lorsque l'hôte du trou noir est une galaxie spirale, le disque qui la constitue se révèle par contre n'avoir aucune influence sur la masse du trou noir central. En outre, la masse du trou noir est fortement corrélée aux vitesses des étoiles à l'intérieur du bulbe galactique. En particulier, plus les étoiles qui constituent ce bulbe ont des vitesses différentes, plus la

une galaxie elliptique ou le bulbe d'une galaxie spirale puisque ces deux objets sont essentiellement de même nature, le bulbe d'une galaxie spirale étant similaire à une galaxie elliptique miniature.

masse du trou noir central est importante. Les trous noirs se sont d'ailleurs formés à une époque de la vie de l'Univers qui coïncide avec la période à laquelle se sont formés les bulbes. Tous ces résultats suggèrent que, quelles que soient les conditions qui ont présidé lors de la formation des bulbes (galaxies elliptiques ou bulbes au centre des galaxies spirales), ce sont ces mêmes événements qui sont à l'origine de la croissance du trou noir.

Les trous noirs augmentent leur masse en engloutissant de la matière (étoiles, gaz...). Cette matière spirale autour du trou noir en formant un disque (appelé disque d'accrétion) avant de venir « s'agglutiner » au trou noir central, accroissant ainsi la masse de ce dernier. En s'approchant du trou noir, la matière subit des frottements de plus en plus importantes et, les frottements créant de la chaleur (il suffit de se frotter vigoureusement les mains pour le vérifier), elle s'échauffe de plus en plus fort. À proximité du trou noir, la matière atteint des températures si élevées qu'elle est portée à incandescence et se met à briller (comme une ampoule à incandescence). En plus de l'émis-

sion d'une grande quantité de lumière, des vents importants ainsi que de puissants jets de particules possédant beaucoup d'énergie (un jet de ce type est représenté sous forme d'un faisceau bleuté sur l'illustration 8) sont propulsés depuis le voisinage du trou noir.

Lors d'une phase de croissance, le trou noir accroît significativement sa masse et accumule de grandes quantités de matière. Il libère de gigantesques quantités d'énergie sous forme de rayons lumineux, de jets et de vents. Ces trous noirs en pleine croissance sont nommés *noyaux actifs de galaxie*. Les trous noirs supermassifs inactifs repérés au centre de certaines galaxies, notamment la nôtre, attestent qu'une fois leur carburant épuisé, les trous noirs s'éteignent.

La (les) phase(s) d'activité d'un trou noir supermassif jouerai(en)t un rôle d'une grande importance dans la formation et l'évolution de sa galaxie-hôte. Cela a de quoi surprendre compte tenu qu'un tel trou noir, bien que possédant une masse exceptionnelle, reste néanmoins mille fois moins massif que la galaxie qui l'héberge et occupe un espace représentant moins d'un cent-milliardième du volume de celle-ci. Comment un objet aussi insignifiant à l'échelle d'une galaxie peut-il avoir un impact considérable sur la galaxie qui l'entoure, voire au-delà ? La réponse réside dans l'absorption par la galaxie-hôte d'une fraction de l'incroyable quantité d'énergie qu'exhale le noyau actif.

Des trous noirs capables d'éteindre une galaxie

L'énergie considérable libérée par un trou noir en activité suffirait à expulser la totalité des gaz encore présents à l'intérieur de la galaxie qui l'abrite. Étant donné que ce sont les nuages de gaz froid contenus dans la galaxie qui servent de berceaux aux étoiles, l'éjection de ces gaz hors de la galaxie conduit à la suppression de toute naissance d'étoile. En d'autres termes, un trou noir actif serait capa-

ble d'éteindre une galaxie entière comme l'on souffle une bougie.

Cette expulsion des gaz galactiques se produirait vraisemblablement après que le trou noir ait atteint une certaine masse. La valeur de cette masse pourrait assez logiquement dépendre de la masse du bulbe qui héberge le trou noir. Cela expliquerait l'étroite relation qui existe entre le trou noir et le bulbe.

L'éjection des gaz par le trou noir central pourrait de plus constituer le phénomène à l'origine de l'arrêt de la formation intensive d'étoiles lors des premiers stades de la vie d'une galaxie. Les trous noirs supermassifs constitueraient alors un ingrédient clé dans la formation des galaxies elliptiques, la suppression de toute production de nouvelles étoiles étant obligatoire afin d'expliquer la couleur rouge qui les caractérise.

Le mécanisme exact utilisé par le trou noir pour supprimer la formation des étoiles n'est cependant pas clairement identifié. Le trou noir pourrait être la source de vents capables de balayer tous ces gaz à l'extérieur de la galaxie. Il pourrait aussi chauffer les gaz de façon à provoquer leur dilatation et empêcher de cette façon les étoiles de se former. Le noyau actif de galaxie peut chauffer le gaz qui l'environne soit grâce à la lumière qu'il irradie, soit grâce à l'interaction de ses jets radio avec le gaz. Ce second mécanisme est intéressant car il pourrait être celui qui continue d'inhiber la formation des étoiles après le tarissement du flot de matière alimentant le trou noir car, dans ce cas, les autres manifestations de l'activité (émission de lumière et propulsion de vents) cessent.

Des trous noirs capables de produire des étoiles

Le trou noir central pourrait jouer un autre rôle dans l'évolution de sa galaxie-hôte. L'énergie libérée par le noyau actif de galaxie, notamment sous forme de vents, pourrait en

effet comprimer le gaz contenu dans cette galaxie et ainsi stimuler la formation de nouvelles étoiles.

Les vents produits par le trou noir en phase d'activité conduiraient à la formation et l'expansion d'une coquille de gaz plus dense. Les étoiles se formeraient à l'intérieur de cette coquille de telle sorte qu'au fur et à mesure du déplacement de la coquille vers l'extérieur de la galaxie, de nouvelles étoiles seraient « déposées » de plus en plus loin du centre galactique. Quelques observations semblent venir confirmer ce phénomène. Il n'est pas interdit d'imaginer qu'une succession d'épisodes de ce type permettraient de faire croître à la fois le trou noir et sa galaxie.

Le fin mot de l'histoire ?

Les trous noirs supermassifs ont incontestablement un impact majeur sur la galaxie qui leur sert d'hôte, en particulier lorsque ce trou noir traverse une période d'activité.

Cependant, la relation exacte qui unit le trou noir central et son hôte est encore controversée. Les mécanismes qui gouvernent l'interaction du noyau actif avec le milieu environnant demeurent mal compris.

De plus, bien que l'existence d'un lien étroit entre galaxie et trou noir supermassif soit avérée, les astronomes ignorent toujours qui, du trou noir ou du bulbe, contrôle la croissance de l'autre. Trois scénarios sont possibles. Premièrement, les trous noirs se forment pour l'essentiel avant le début de la formation des galaxies et régulent la taille du bulbe qui se construit autour d'eux. Deuxièmement, le trou noir et le bulbe galactique croissent simultanément. Troisièmement, le trou noir accumule la majorité de sa masse après la formation de la galaxie à partir du gaz contenu dans cette dernière.

En résumé, il reste beaucoup de travail aux scientifiques pour comprendre enfin cette mystérieuse connexion entre la galaxie et son noyau et déterminer l'impact réel de ce noyau sur la formation et l'évolution de la galaxie qui l'entoure.

Références

- Boselli, A. (2011), *A panchromatic View of Galaxies*. Tiré de <http://books.google.be>.
- Cattaneo, A. et al. (2009), *The role of black holes in galaxy formation and evolution*, *Nature*, 460, 213-219.
- Dekel, A., Sari, R., et Ceverino, D. (2009), *Formation of Massive Galaxies at High Redshift: Cold Streams, Clumpy Disks and Compact Spheroids*, *The Astrophysical Journal*, 703 (1), 785-801.
- Ibashi, W. et Fabian, A. C. (2012), *Active galactic nucleus and triggering of star formation in galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomy Society*, 427, 2998-3005.
- Kormendy, J. et Gebhardt, K. (2001), *Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei*, *Relativistic Astrophysics: 20th Texas Symposium*, 586, 363-381.
- Page, M. J. et al. (2012), *The suppression of star formation by powerful active galactic nuclei*, *Nature*, 485, 213-216.
- Silk, J. et Rees, M. J. (1998), *Quasar and galaxy formation*, *Astronomy and Astrophysics*, 331, L1-L4.
- Shawinski, K. et al. (2006), *Suppression of star formation in early-type galaxies by feedback from supermassive black holes*, *Nature*, 442, 214-216.