

pendiculaires au disque galactique révèle deux masses principales de gaz, l'une s'éloignant et l'autre s'approchant de la Terre. La différence de vitesse entre les deux augmente avec l'éloignement du cœur, atteignant environ 350 kilomètres par seconde à une distance de 3 000 années-lumière. À 4 500 années-lumière du noyau, la différence de vitesse s'amenuise.

La flambée observée dans le noyau de M 82 semble résulter d'une rencontre récente avec les galaxies voisines M 81 et NGC 3077. Sa luminosité infrarouge est 30 milliards de fois supérieure à la luminosité totale du Soleil, et les radio-astronomes y ont identifié les restes d'un grand nombre de supernovae. Le tissu filamentaire, visible de la Terre, résulte de deux bulles ovoïdes orientées perpendiculairement au disque de M 82, de part et d'autre du noyau. Des observatoires spatiaux équipés de systèmes de détection des rayons X ont enregistré l'émission du vent chaud qui gonfle ces bulles ; leur apparence mousseuse provient d'instabilités dans le gaz chaud qui se refroidit.

Une activité ambiguë

Dans de nombreux cas, la source principale d'énergie des galaxies actives est difficilement identifiable. Parfois une flambée d'étoiles semble coexister avec un trou noir. Comme M 82, beaucoup de ces galaxies sont anormalement brillantes aux longueurs d'onde

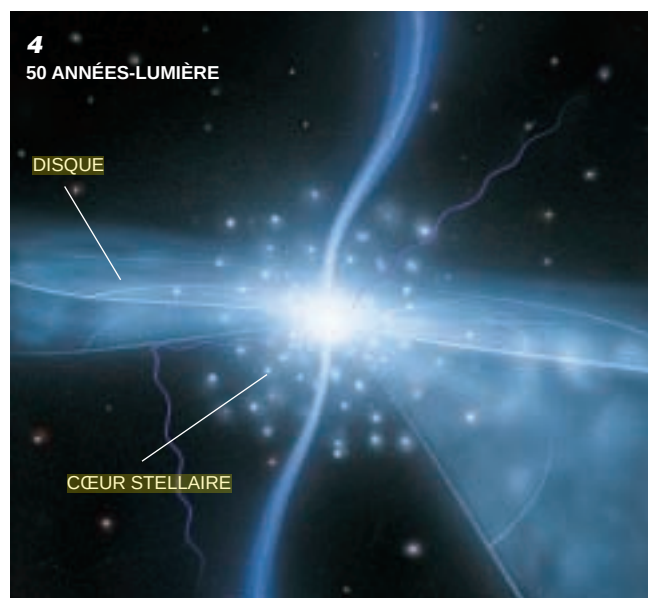
infrarouges et riches en gaz moléculaire, le matériau de base des étoiles. Leur émission radio et leur spectre dans le domaine visible ressemblant à ceux d'un quasar, il est probable qu'un trou noir se trouve en leur sein.

Cette ambiguïté complique l'interprétation du comportement de la galaxie proche NGC 3079. Nous voyons cette galaxie spirale par la tranche – position avantageuse pour étudier le gaz éjecté du noyau. Comme M 82, NGC 3079 est anormalement brillante dans l'infrarouge et contient un disque massif de gaz moléculaire qui s'étend sur 8 000 années-lumière autour du cœur. Ce dernier est très brillant aux longueurs d'onde radio ; en sortent des structures fines et droites, qui émettent dans ce même domaine spectral et qui indiquent une éjection de matière collimatée. Plus loin, l'émission radio présente une structure complexe, s'étendant sur plus de 6 500 années-lumière de part et d'autre du disque galactique.

Des images formées par la lumière rouge de l'hydrogène montrent un anneau presque circulaire de 3 600 années-lumière de diamètre à l'Est du noyau ; les mesures de vitesse confirment que cet anneau délimite les bords d'une bulle. L'extrémité pointue de la bulle ovoïde repose sur le noyau, et son grand axe est aligné avec le pôle galactique. Une autre bulle se trouve à l'Ouest du noyau, mais les poussières du disque galactique en dis-

simulent la plus grande partie. Nos observations spectrales indiquent que l'énergie totale de cet écoulement violent est dix fois supérieure à celle des explosions dans NGC 1068 ou M 82. L'alignement de la bulle ovoïde avec l'axe polaire de la galaxie hôte indiquerait que la collimation du flot est due à la poussière et au gaz galactique plutôt qu'à un trou noir, mais de très nombreuses autres caractéristiques de la galaxie font penser qu'un trou noir est tapi en son cœur.

Une flambée d'étoiles dans le noyau est-elle seule responsable de cette gigantesque explosion ? Pour y répondre, nous avons analysé le rayonnement infrarouge qui émane de la région de formation d'étoiles. La majorité du rayonnement ultraviolet des étoiles naissantes enveloppées dans des nuages moléculaires est absorbée, puis réémise dans l'infrarouge. De fait, la luminosité infrarouge du noyau de NGC 3079 constitue un bon indicateur de la vitesse à laquelle les supernovae et les vents stellaires injectent de l'énergie au centre de la galaxie. En comparant les prédictions du modèle de flambée d'étoiles avec nos observations, nous trouvons que les vents stellaires et les supernovae possèdent suffisamment d'énergie pour dilater la bulle : le trou noir dans le cœur de NGC 3079 contribue peut-être à l'éjection de matière, mais la flambée d'étoiles, à elle seule, pourrait être responsable de l'explosion.



sité élevée du gaz qui s'effondre sur le centre, dans un rayon de quelques dizaines d'années-lumière, provoque un sursaut de formation d'étoiles (4). Encore plus près du centre (5), le disque rayonne aux longueurs d'onde ultraviolettes et X, s'amincissant



vers l'intérieur pour alimenter ce que les astrophysiciens pensent être un trou noir ; malgré sa masse plusieurs millions de fois supérieure à celle du Soleil, ce trou noir serait trop petit pour être visible.

Comment se forment les galaxies actives?

Bien que les astrophysiciens comprennent aujourd'hui les mécanismes de base qui animent les galaxies actives, de nombreux détails demeurent obscurs. Quels mécanismes amorcent la flambée d'étoiles ou forment le trou noir central? Comment le combustible est-il acheminé vers le noyau? Des interactions gravitationnelles avec des galaxies riches en gaz redistribuent le gaz dans la galaxie hôte, peut-être en formant une barre

d'étoiles comme celle de NGC 1068. Des simulations numériques indiquent que la barre, une fois formée, demeure assez stable (voir Les collisions de galaxies, par Joshua Barnes, Lars Hernquist et François Schweizer, *Pour la Science*, octobre 1991). De surcroît, NGC 1068 ne possède aujourd'hui aucune compagne proche, ce qui confirme que la barre doit y être stable.

Les astrophysiciens ne sont pas d'accord sur l'ordre d'apparition des mécanismes. La flambée d'étoiles constitue peut-être une première phase

de l'évolution des galaxies actives, qui finit par s'éteindre en laissant un amas dense de vestiges stellaires qui s'effondre en un trou noir massif.

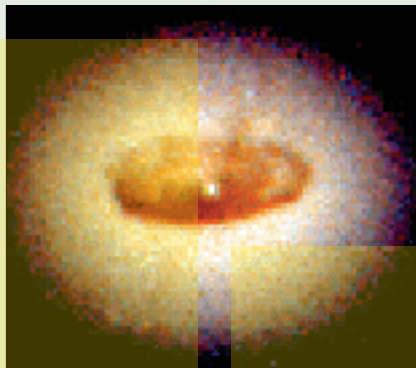
Les puissants flots de gaz visibles dans les galaxies actives qui ont été étudiées ne sont que des exemples remarquables de mécanismes généraux, mais moins violents, qui touchent beaucoup de galaxies. Les galaxies infrarouges lumineuses sont nombreuses, et de plus en plus d'indices conduisent les astrophysiciens à croire qu'un nombre important de

Trous noirs, étoiles chaudes et galaxies actives

Depuis la découverte des quasars dans les années 1960, la présence d'un trou noir très massif en leur centre expliquait l'énergie considérable – l'équivalent de l'énergie produite par des centaines de millions d'étoiles – qui s'échappe de régions à peine plus grande que le Système solaire! Pourtant, les théories utilisant des trous noirs ne parviennent pas à expliquer l'ensemble des observations associées aux galaxies à noyaux actifs. Pour y remédier, R. Terlevich eut l'idée d'un autre mécanisme : concentrées dans la galaxie, des étoiles très massives et très chaudes rendraient compte de l'état du gaz et des propriétés spectroscopiques des noyaux actifs.

Les deux théories, celle du trou noir, présentée comme classique, et celle des «radiateurs» (étoiles chauffantes) ont fait l'objet d'âpres débats. Malheureusement, la théorie des radiateurs présente, elle aussi, des difficultés dont la principale est que nous ignorons si de telles étoiles existent! Ces étoiles n'ont jamais été observées et, quand bien même elles existeraient, les astrophysiciens ne s'accordent pas sur leur propriété : certains pensent que leurs atmosphères seraient trop opaques pour reproduire les observations. C'est pourquoi la plupart des astronomes admettent aujourd'hui qu'une théorie combinant les deux approches serait la plus plausible.

Pourtant, les images et les spectres du télescope spatial *Hubble* étayaient l'hypothèse de l'existence au cœur de galaxies non actives de trou noir massifs entourés et alimentés par des disques de gaz et de poussières. Après le trou noir de 2,4 milliards de fois la masse du Soleil au cœur de la galaxie elliptique M87, les astronomes ont observé à l'aide du télescope spatial un nouveau trou noir dans la galaxie NGC 4261, également dans la constellation de la Vierge (voir la photographie). Finalement, au mois de janvier 1996, un trou noir de deux milliards de masses solaires fut découvert dans la galaxie NGC 3115, située à 30 millions d'années-lumière dans la constella-



AU CŒUR de la galaxie NGC 4261, un disque de poussière et de gaz tombe sur un trou noir de 1,2 milliard de masses solaires.

tion du Sextant. Ces résultats montreraient que la plupart, voire toutes les galaxies, contiennent des trous noirs en leur centre. Ces trous noirs étaient actifs il y a longtemps, ce qui expliquerait le grand nombre de quasars dans l'Univers primordial (à grande distance).

Notons que, mis à part l'aspect spectaculaire des images du télescope spatial, les contraintes les plus fortes sur les dimensions des régions émettrices proviennent de l'étude de la variabilité, qui est peu évoquée dans l'article. La dimension de la région émettrice est inférieure au temps

caractéristique de variation multipliée par la vitesse de la lumière. Plus une étoile est massive, moins elle vit longtemps. Ainsi, dans l'hypothèse où le cœur des noyaux de galaxies abriterait une intense activité de formation stellaire, la variabilité résulterait de l'interaction de la matière éjectée par l'explosion des étoiles massives avec le milieu interstellaire dense environnant. Dans cette étude, R. Terlevich fait figure de pionnier.

En France, de nombreux chercheurs, dont Danielle Alloin, au Service d'astrophysique de Saclay, Monique Joly et Suzy Collin, à l'Observatoire de Paris-Meudon, étudient les propriétés d'un disque de gaz et de poussière accrété par le trou noir central. Simultanément, ces astronomes participent à des campagnes de «surveillance» dans tout le spectre électromagnétique, ce qui permet d'échantillonner la variabilité des noyaux actifs de galaxies.

Une théorie réunissant les trous noirs et les étoiles très massives verra-t-elle le jour? On peut penser que la formation d'étoiles qui constituent le bulbe des galaxies est à l'origine des trous noirs et des nombreux quasars observés à grande distance. Une fois le trou noir établi, le phénomène peut devenir récurrent : si de la matière continue à tomber sur le trou noir, le noyau produira des phénomènes d'activité violente ou conduira peut-être même à de nouveaux épisodes de formation d'étoiles.

Daniel KUNTH – Institut d'astrophysique de Paris

leurs noyaux sont le siège d'explosions. Ces événements modifient profondément la formation des étoiles dans tout le voisinage galactique. Par exemple, la bulle de NGC 3079 est percée au sommet et laisse ainsi échapper de la matière dans le halo galactique et peut-être même dans l'espace intergalactique. Les réactions nucléaires à l'œuvre dans l'avalanche de supernovae provoquée par la flambée d'étoiles enrichissent ce vent chaud en éléments chimiques lourds. Il en résulte que le vent chauffera son environnement, mais aussi en modifiera la composition chimique.

On connaît encore trop mal l'état des galaxies plus lointaines pour estimer l'impact de ce «bain de mousse cosmique» sur l'histoire de l'Univers. Grâce aux images de galaxies lointaines qui seront prises par le télescope *Hubble*, quand des astronautes l'auront perfectionné, en 1997, nous pourrions clarifier certaines de ces questions. Nos instruments, collectant la lumière émise par ces galaxies il y a des milliards d'années, nous révèlent sans doute un analogue de notre propre préhistoire galactique, qui se déroule ailleurs dans l'Univers.

Sylvain VEILLEUX est professeur d'astronomie à l'Université du Maryland. Gerald CECIL est professeur d'astronomie et de physique à l'Université Chapel Hill. Jonathan BLAND-HAWTHORN est astronome à l'Observatoire de Sydney.

Jonathan BLAND et R. Brent TULLY, *Large-Scale Bipolar Wind in M82*, in *Nature*, vol. 334, pp. 43-45, 7 juillet 1988.

G. CECIL, J. BLAND et R.B. TULLY, *Imaging Spectrophotometry of Ionized Gas in NGC 1068, Part 1 : Kinematics of the Narrow-Line Region*, in *Astrophysical Journal*, vol. 355, pp. 70-87, 20 mai 1990.

Relationships between Active Galactic Nuclei and Starburst Galaxies, Proceedings of the Taipei Astrophysics Workshop, 1991, sous la direction d'Alexei V. Filippenko, Astronomical Society of the Pacific, 1992.

S. VEILLEUX, G. CECIL, J. BLAND-HAWTHORN, R.B. TULLY, A.V. FILIPPENKO et W.L.W. SARGENT, *The Nuclear Superbubble of NGC 3079*, in *Astrophysical Journal*, 1^{ère} partie, vol. 433, pp. 48-64, 20 septembre 1994.

R.B. TULLY, J. MORSE et P. SHOPBELL, *Dissecting Cosmic Explosions*, in *Sky and Telescope*, vol. 90, n° 1, pp. 18-21, juillet 1995.
