

supérieure. L'Observatoire spatial *Compton* a détecté un important rayonnement gamma en provenance de certains quasars, ce qui indiquerait que des trous noirs se terrent en leur centre (voir *L'Observatoire Compton*, par N. Gehrels, C. Fichtel, G. Fishman, J. Kurfess et V. Schönfelder, *Pour la Science*, février 1994).

Une dernière différence entre les deux mécanismes tient aux forces qui canalisent le gaz éjecté. Quand un trou noir est présent, les lignes de champ magnétique ancrées au disque d'accrétion canalisent la matière (un plasma ionisé) en un jet étroit, le long de l'axe de rotation du disque. En revanche, la matière en expansion d'une bulle créée par une flambée d'étoiles suit simplement le chemin de moindre résistance dans le milieu galactique. Une puissante flambée d'étoiles dans une galaxie spirale éjectera le gaz perpendiculairement au plan du disque galactique (où la densité de matière est moindre), et le flot se répartira dans une région en forme de sablier (voir la figure 1c). C'est pourquoi les jets radio étroits qui s'étendent sur des millions d'années-lumière, loin du noyau de certaines galaxies actives, indiquent la présence de trous noirs.

Les signatures spectrales

Toutes nos connaissances sur les galaxies, que celles-ci soient actives ou non, proviennent du rayonnement qu'elles émettent. À l'Observatoire d'Hawaii, nous nous sommes intéressés à la partie visible du spectre électromagnétique, qui permet de déterminer les températures, pressions et concentrations de divers atomes du gaz chauffé par les explosions galactiques. Nous comparons les raies d'émission d'atomes et de molécules excités, ou ionisés, aux raies créées dans des laboratoires terrestres ou déduites de calculs théoriques.

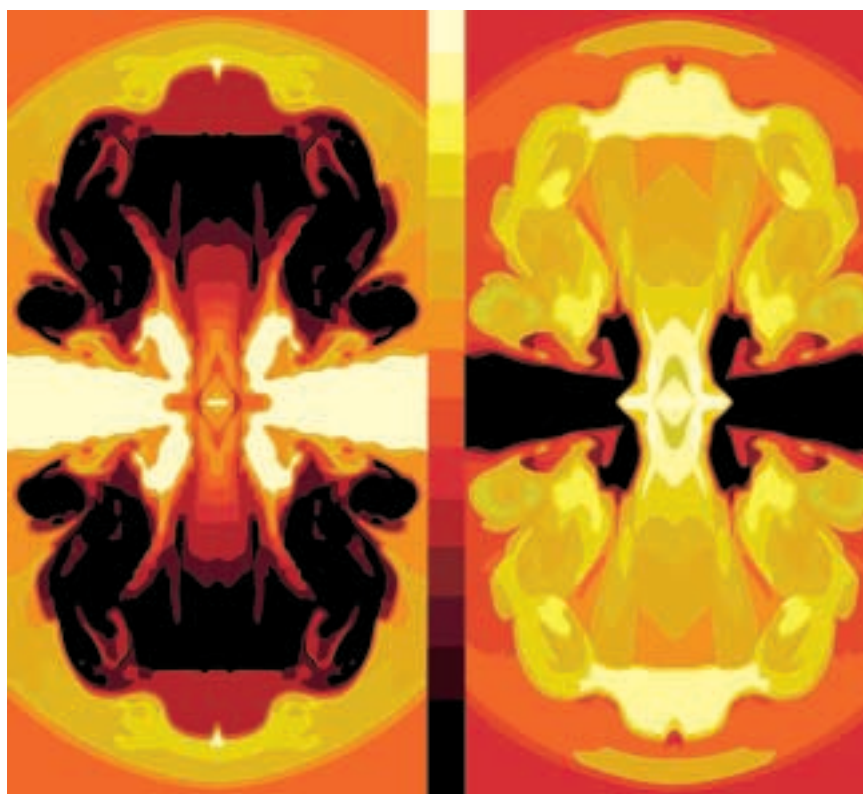
Grâce à l'effet Doppler, qui modifie la fréquence et la longueur d'onde de la lumière émise par des sources mobiles, nous déterminons aussi la vitesse du gaz : la lumière émise par le gaz qui s'approche de la Terre est décalée vers la partie bleue du spectre, tandis que celle émise par le gaz qui s'éloigne est décalée vers le rouge, tout comme la sirène d'une ambulance qui approche est plus aiguë que la sirène d'une ambulance qui s'éloigne.

Naguère les astrophysiciens étudiaient le gaz par deux méthodes complémentaires : l'imagerie des raies d'émission et la spectroscopie à longue fente. La première forme des images à partir de la lumière qui traverse un filtre qui sélectionne la lumière d'une longueur d'onde particulière émise par un élément comme l'hydrogène. Ces images révèlent souvent les spectaculaires structures filamenteuses des explosions, mais n'indiquent ni la vitesse ni la direction des mouvements de gaz, car le filtre ne révèle pas les décalages vers le rouge ou vers le bleu. Les spectromètres à longue fente, qui séparent la lumière en ses rayonnements constitutifs, fournissent des informations détaillées sur les mouvements gazeux, mais pour une région minuscule.

Depuis près d'une décennie, notre groupe utilise un instrument qui combine les avantages des deux méthodes. L'interféromètre à imagerie Fabry-Pérot d'Hawaii (HIFI) fournit des informations spectroscopiques détaillées sur un large champ spatial. Inventés par les Français Charles Fabry et Alfred Pérot au tournant du siècle, ces inter-

féromètres sont utilisés en astronomie. Au sein de l'appareil, on trouve deux lames de verre parallèles, séparées par moins d'un vingtième de millimètre. Les faces internes des lames sont réfléchissantes, de sorte que la lumière incidente est réfléchiée plusieurs fois entre les lames ; les interférences destructrices engendrées atténuent toute les longueurs d'onde de la lumière à l'exception de certaines, déterminées par la séparation entre les lames. En ajustant cette dernière, on obtient une série d'images qui représente une cartographie spectrale du champ observé : l'interféromètre fournit le spectre en chaque point.

Le spectrographe que nous utilisons est installé sur le télescope de 2,2 mètres de diamètre de l'Université d'Hawaii et sur le télescope Canada-France-Hawaii de 3,6 mètres, au sommet du Mauna Kea, à 4 200 mètres d'altitude. Des caméras à transfert de charges, stables et sensibles à la lumière ténue des galaxies, collectent les photons. En une nuit, cette instrumentation performante enregistre jusqu'à un million de spectres qui couvrent toute une galaxie.



3. UN ÉPANCHEMENT DE GAZ devient rapidement turbulent dans cette simulation numérique d'une galaxie active dont l'apport énergétique provient d'une flambée d'étoiles. Une carte des températures (à gauche) illustre comment le gaz chaud émanant du noyau déplace le gaz galactique plus froid qui l'entoure. Le choc qui en résulte apparaît sur une carte de la densité du gaz (à droite).

Les galaxies actives proches

Nous avons utilisé notre interféromètre pour étudier NGC 1068, une galaxie spirale active distante de 46 millions d'années-lumière. Cette galaxie, la plus proche et la plus brillante de ce type visible dans l'hémisphère Nord, a été beaucoup étudiée. Aux longueurs d'onde radio, NGC 1068 ressemble à un quasar miniature : deux jets s'étendent jusqu'à 900 années-lumière du cœur, avec une émission diffuse qui provient de régions plus lointaines. On suppose que les jets radio résultent de l'émission d'un plasma gazeux qui se déplace à des vitesses proches de

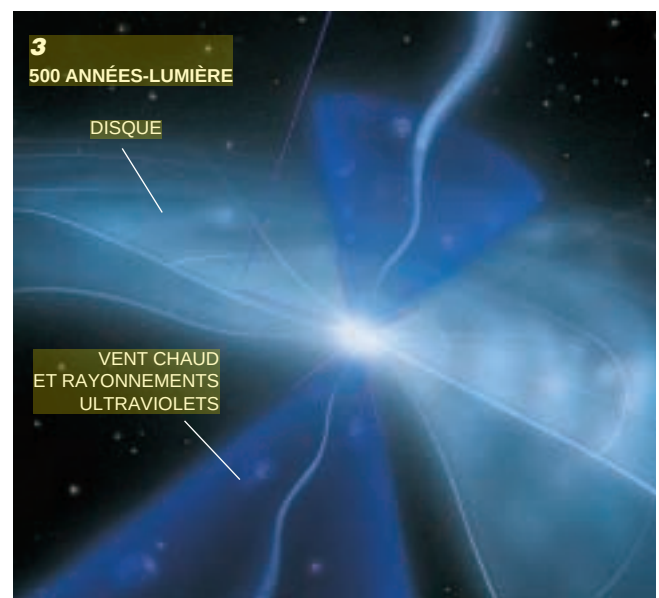
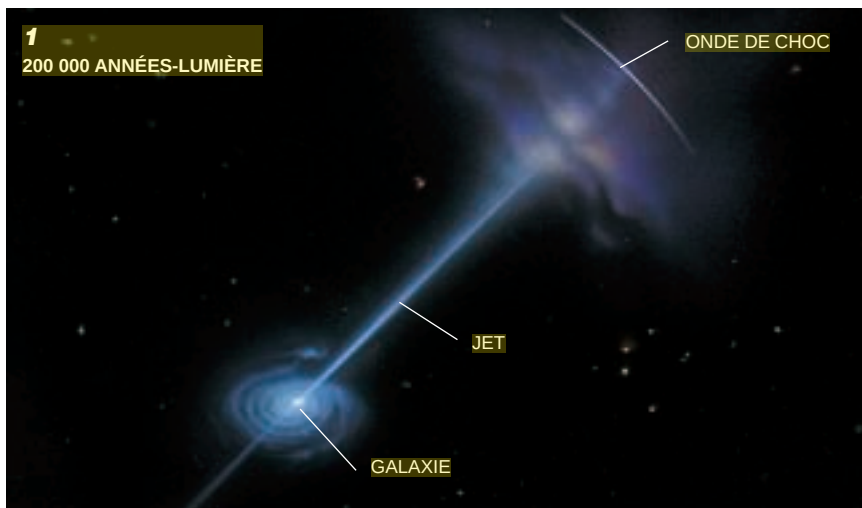
celle de la lumière ; le plasma qui rencontre la matière du disque galactique engendre des «lobes radio» qui émettent d'intenses ondes radio. À l'instar d'un avion supersonique, le bord d'attaque du jet Nord-Est crée un front de choc en forme de V.

Les mêmes régions émettent aussi de grandes quantités de lumière visible et d'ultraviolets. Nous avons toutefois découvert que dix pour cent seulement de la lumière provient du noyau. Le gaz du disque galactique accumulé au bord en expansion du lobe radio Nord-Est contribue pour cinq pour cent supplémentaires. Tout le reste provient de deux faisceaux de gaz rapide, s'éloignant du centre à des vitesses de 1 500 kilomètres par

seconde. Ces deux faisceaux coniques se composent de filaments denses de matière qui ont été balayés par le vent chaud produit par le disque d'accrétion. L'axe des cônes n'est pas aligné avec l'axe polaire galactique.

L'activité dans le noyau se fait sentir à plusieurs milliers d'années-lumière, bien au-delà des lobes radio : le gaz interstellaire diffus se trouve à des températures exceptionnellement élevées, auxquelles une grande partie des atomes et des molécules ont été ionisés, ayant perdu certains de leurs électrons. Simultanément des phénomènes au sein du disque semblent perturber le noyau : des images dans l'infrarouge dévoilent une barre allongée d'étoiles qui s'étend à plus de 3 000 années-lumière du noyau. Les mesures de vitesse par interférométrie indiquent que la barre déforme l'orbite circulaire du gaz dans le disque et canalise la matière vers le centre de la galaxie. Cet afflux de matière pourrait alimenter le trou noir central.

Une autre explosion colossale se déroule dans le cœur de l'une des galaxies les plus proches de nous, M 82, distante de quelques millions d'années-lumière. Ce cataclysme est un prototype des systèmes engendrés par une flambée d'étoiles. Des images prises à travers un filtre ne laissant passer que la lumière rouge des atomes d'hydrogène en formation montrent un tissu de filaments qui s'échappent par les pôles galactiques. La cartographie spectrale de l'émission des filaments per-



4. LES FORCES COLOSSALES qui sont à l'œuvre au centre des galaxies actives se font sentir à plus d'un demi-million d'années-lumière parce qu'elles engendrent des jets de gaz qui pénètrent à des vitesses proche de celle de la lumière dans le halo galac-

tique, créant d'énormes ondes de choc (1). Plus près du centre de la galaxie (2, 3), un disque équatorial dense de poussière et de gaz moléculaire alimente le noyau actif en matière tandis que du gaz chaud et du rayonnement s'échappent des pôles. La den-

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

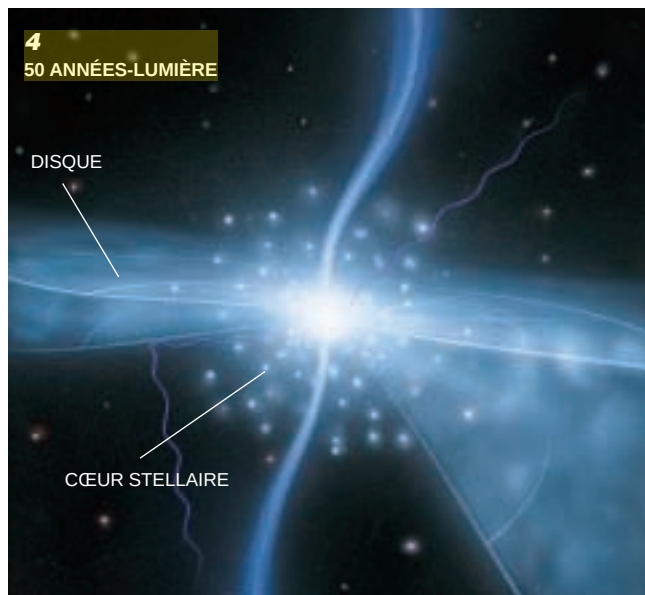
infrarouges et riches en gaz moléculaire, le matériau de base des étoiles. Leur émission radio et leur spectre dans le domaine visible ressemblant à ceux d'un quasar, il est probable qu'un trou noir se trouve en leur sein.

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.

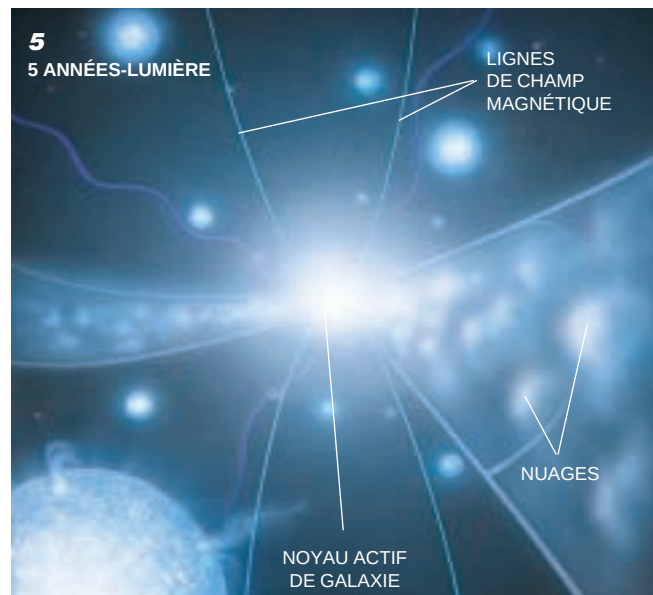
Des images formées par la lumière rouge de l'hydrogène montrent un anneau presque circulaire de 3 600 années-lumière de diamètre à l'Est du noyau ; les mesures de vitesse confirment que cet anneau délimite les bords d'une bulle. L'extrémité pointue de la bulle ovoïde repose sur le noyau, et son grand 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.