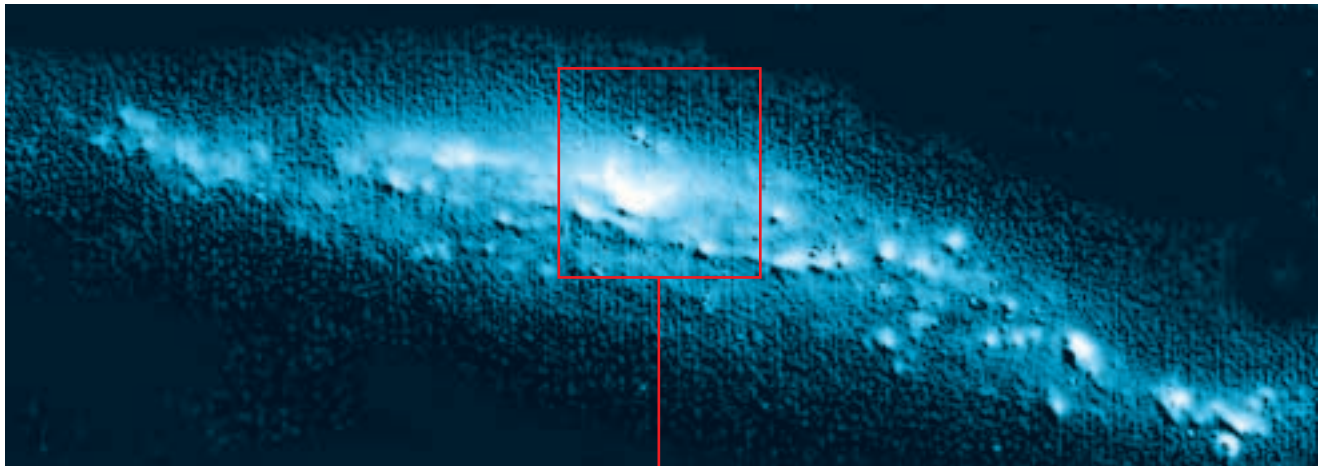


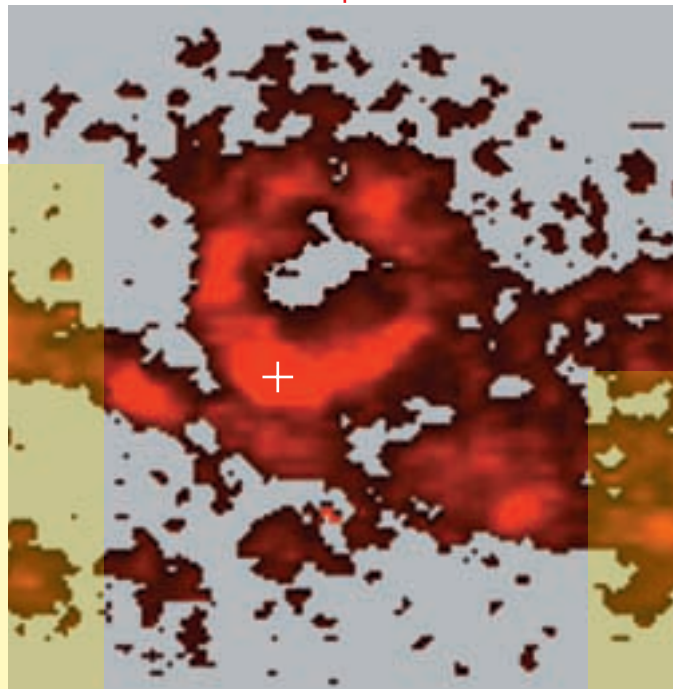


la coquille ainsi que le gaz chaud dans le halo galactique et au-delà, à des milliers d'années-lumière de leurs origines.

Roberto Terlevich et ses collègues de l'Institut d'astronomie de Cambridge ont cherché si les flambées d'étoiles pouvaient entraîner, à elles seules, les déversements de gaz chauds caractéristiques des galaxies actives. En 1985, ils soutenaient que beaucoup de ces galaxies contenaient des étoiles peu communes, qu'ils nommèrent «radiateurs». Ces étoiles extrêmement chaudes (leur température de surface est supérieure à 100 000 degrés, alors que celle du Soleil n'est que de 5 000 degrés) produisent de puissants vents stellaires. Elles apparaîtraient naturellement lorsqu'une flambée stellaire se produit dans une région enrichie en éléments chimiques lourds par des supernovae antérieures, et donneraient lieu aux spectres et à diverses caractéristiques de certaines galaxies actives.

Trou noir ou flambée ?

Comment savoir si les galaxies actives contiennent un trou noir ou si elles sont plutôt le siège d'une flambée stellaire ? Alors qu'un trou noir convertit en énergie jusqu'à dix pour cent de la masse de la matière en effondrement, la formation d'étoiles résulte de la fusion nucléaire, qui ne peut libérer que 0,1 pour cent de la masse réagissante ; elle



2. UNE FLAMBÉE GALACTIQUE, due à la naissance de nombreuses étoiles au centre de la galaxie NGC 3079, semble être responsable de l'activité observée (en haut). Le centre de la galaxie semble renfermer un trou noir. Un gros plan de la région proche du noyau (celui-ci est marqué par une croix blanche) révèle le contour d'une énorme bulle en expansion dans le milieu interstellaire, gonflée par la chaleur des étoiles qui se forment en son sein.

requiert donc 100 fois plus de matière, dont la majorité s'accumule comme combustible non brûlé. Sur l'ensemble de la vie d'un quasar alimenté par des flambées d'étoiles, la masse accumulée dans le noyau de la galaxie atteindrait un milliard de fois la masse du Soleil, soit presque la masse de la Voie lactée.

Plus un noyau galactique est massif, plus les vitesses orbitales des étoiles sont grandes. Les observations à partir du sol, dans le domaine visible, sont limitées par la turbulence atmosphérique et n'ont longtemps révélé aucun mouvement rapide dans un noyau de

galaxie. Récemment, toutefois, des observations à l'aide de radiotélescopes ont montré qu'un disque d'accrétion d'une demi-année-lumière de rayon interne, tournant rapidement autour d'une masse 20 millions de fois supérieure à celle du Soleil était confiné au centre de la galaxie spirale proche NGC 4258.

Aujourd'hui, plusieurs groupes d'astrophysiciens mesurent la répartition des mouvements stellaires à travers les noyaux galactiques à l'aide du spectrographe du télescope spatial *Hubble*. Cette technique a déjà prouvé son efficacité en montrant que, dans le cœur de la galaxie active M 87, le gaz se mouvait de manière analogue à un disque d'accrétion autour d'un trou noir.

Les flambées d'étoiles et les trous noirs diffèrent également par les spectres des photons les plus énergétiques qu'ils engendrent. Près des trous noirs, la conjugaison d'un champ magnétique intense et d'un disque d'accrétion dense crée un plasma de particules chaudes et rapides qui émettent des rayons X et des rayons gamma. En revanche, dans le cas des flambées d'étoiles, la majorité du rayonnement de haute énergie provient de la collision de la matière éjectée par les supernovae avec la poussière galactique et le gaz environnants. Cette collision chauffe le gaz à une température de un milliard de degrés et ne peut produire de rayonnement gamma, qui nécessiterait une température dix fois

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.

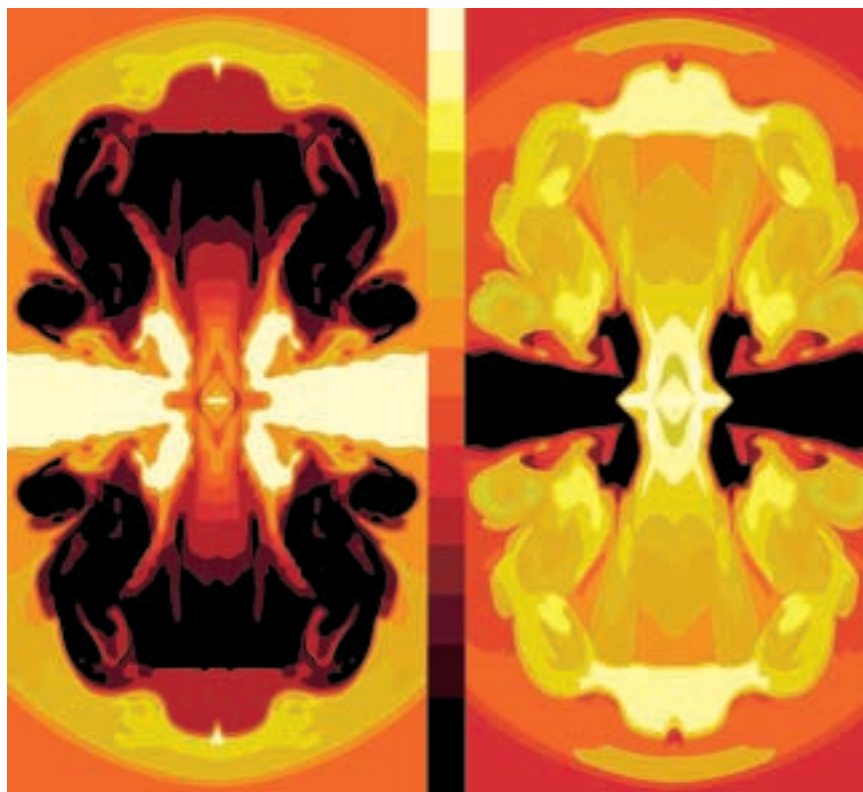
Grâce à l'effet Doppler, qui modifie la fréquence et la longueur d'onde de la lumière émise par des sources mobiles, nous déterminons aussi la vitesse du gaz : la lumière émise par le gaz qui s'approche de la Terre est décalée vers la partie bleue du spectre, tandis que celle émise par le gaz qui s'éloigne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