

La fin d'un dogme

La perspective d'utiliser des drogues antitélomérases pour traiter le cancer est séduisante, à condition que les biologistes démontrent que la télomérase est effectivement indispensable à la multiplication sans fin des cellules tumorales.

Or, Roger Reddel et ses collègues de l'Université de Sidney ont récemment montré que 15 des 35 lignées cellulaires établies *in vitro* qu'ils étudiaient étaient immortelles sans qu'ils puissent détecter d'activité télomérase. Et pourtant, ces lignées télomérase-négatives ont des télomères très longs, plus longs que les cellules normales. De plus, avec John Murnane, de l'Université de San Francisco, nous avons suivi l'évolution de la longueur des séquences télomériques et de l'instabilité chromosomique dans des clones d'une lignée télomérase-négative. Nous avons montré la grande hétérogénéité de la taille des séquences télomériques et l'importance de l'instabilité chromosomique qui en résultait : même en l'absence apparente de télomérase, certains télomères étaient beaucoup plus longs que dans les cellules normales.

On ignore encore comment, dans ces lignées télomérase-négatives, la taille des télomères est maintenue ou allongée. Plusieurs hypothèses sont avancées : la télomérase agirait, mais de façon fugace ; la télomérase

serait mutée et perdrait le contrôle de la longueur des télomères ; des mécanismes de recombinaison, dont l'existence a été montrée dans la levure, compenseraient par transfert de fragments chromosomiques le raccourcissement des télomères ; enfin, des éléments transposables, des fragments d'ADN qui « sautent » d'un endroit à l'autre d'un chromosome, compenseraient la perte de sous-unités télomériques.

Ces résultats remettent en cause le dogme selon lequel la télomérase est indispensable pour conférer leur immortalité aux cellules cancéreuses.

Si ces mécanismes de compensation existent *in vivo*, des drogues antitélomérase seraient bénéfiques au début du traitement, car elles élimineraient les cellules cancéreuses synthétisant de la télomérase. Au bout de quelque temps, ne resteraient que les cellules tumorales ne fabriquant pas de télomérase et auxquelles les longs télomères confèreraient un potentiel de divisions cellulaires notablement supérieur à celui des cellules normales. Les drogues antitélomérase risqueraient de sélectionner des cellules tumorales se divisant de nombreuses fois, c'est-à-dire accumulant les mutations potentiellement dangereuses : elles auraient un pouvoir malin supérieur.

Laure SABATIER – CEA

Département de radiobiologie et de radiopathologie

que les substances inhibitrices de la télomérase détruiraient les cellules cancéreuses bien avant les cellules saines, puisque leurs télomères sont plus courts dans certaines tumeurs.

On devra également démontrer que l'inhibition de la télomérase détruit effectivement les tumeurs qui produisent l'enzyme. En septembre 1995, nous avons montré qu'un inhibiteur de la télomérase provoque effectivement un raccourcissement des télomères de cellules tumorales en culture ; les cellules meurent au bout de 25 divisions environ. Malheureusement, ces cellules compensent parfois la perte de télomérase en réparant les extrémités raccourcies par un mécanisme de recombinaison, par exemple (un chromosome prélève de l'ADN sur un autre chromosome). Si ces mécanismes de compensation sont fréquents dans les tumeurs humaines, les substances visant la télomérase ne pourront traiter efficacement les cancers.

Les études animales nous aideront à répondre à ces questions. Elles montreront également si des inhibiteurs de la télomérase éliminent des tumeurs et s'ils agissent suffisamment rapidement pour que les tissus sains ne soient pas lésés.

Pour mettre au point des inhibiteurs de la télomérase, on devra également comprendre comment agit l'enzyme. Comment se lie-t-elle à l'ADN ? Comment « décide »-t-elle du nombre de sous-unités télomériques à ajouter ? L'ADN du noyau est soumis à l'action de diverses protéines, notamment à celles qui s'associent aux télomères ; comment ces protéines commandent-elles l'activité de la télomérase ? Leur inhibition modifierait-elle la longueur des télomères ?

Les recherches sur les télomères devraient avoir d'autres applications, en thérapie génique par exemple. Cette méthode consiste à prélever des cellules sur un patient, à y insérer le gène thérapeutique, puis à réinjecter au malade les cellules corrigées génétiquement. Cette méthode reste délicate, car les cellules se développent difficilement en culture. L'adjonction de télomérase, seule ou associée à divers facteurs, augmenterait la capacité répliquative des cellules cultivées, de sorte que l'on pourrait réinjecter au patient davantage de cellules corrigées.

La recherche sur les télomères a considérablement progressé depuis la découverte des premières sé-

quences répétées aux extrémités des chromosomes de *Tetrahymena*. L'élongation des télomères par la télomérase, qui semblait initialement une petite astuce permettant à quelques êtres unicellulaires de maintenir la longueur de leurs chromosomes, s'est révélée bien plus importante qu'on ne le croyait. Pour la plupart des animaux, la télomérase permet aux cellules nucléées de protéger les segments terminaux des chromosomes, et l'étude de cette « astuce » aboutira peut-être à des traitements anticancéreux efficaces.

Carol GREIDER est biologiste moléculaire au Laboratoire Cold Spring Harbor. Elizabeth BLACKBURN dirige le Département de microbiologie et d'immunologie de l'Université de San Francisco.

G.L. YU, J.D. BRADLEY, L.D. ATTARDI et E.H. BLACKBURN, *In Vivo Alteration of Telomere Sequences and Senescence Caused by Mutated Tetrahymena Telomerase RNAs*, in *Nature*, vol. 344, pp. 126-132, 8 mars 1990.

Telomeres, sous la direction de E.H. Blackburn et C.W. Greider, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1995.

Des explosions au cœur des galaxies

SYLVAIN VEILLEUX • GERALD CECIL • JONATHAN BLAND-HAWTHORN

Les flots de gaz brûlants qui s'échappent du centre des galaxies proches seraient à l'origine des étoiles et du milieu intergalactique.

Alors que des millions de galaxies luisent grâce à la lumière combinée de leurs milliards d'étoiles, certaines seulement ont un noyau central dont l'éclat est prépondérant. Ces noyaux sont trop petits pour que les télescopes, même les plus puissants, en révèlent la structure, mais des débris des colossales explosions dont ils sont le siège apparaissent parfois en dehors du cœur compact où elles se produisent. Ces débris, des gaz chauffés à des millions de degrés, sont éjectés suffisamment loin des noyaux galactiques pour être visibles de la Terre.

Les traînées de cette matière surchauffée, dans le gaz et la poussière interstellaires, nous renseignent sur la nature et sur l'histoire des forces à l'œuvre au sein des noyaux galactiques. Aujourd'hui, les astrophysiciens identifient les moteurs de ces phénomènes et les effets de leurs gigantesques flots sur l'évolution des galaxies.

De surcroît, ces cataclysmes, qui ont commencé très tôt dans l'histoire de l'Univers, ont contribué à forger l'environnement où a évolué la Voie lactée. L'étude de ces événements pourrait éclairer la répartition des éléments chimiques dans notre Galaxie, cruciale pour comprendre la formation des planètes et l'existence de la vie.

Les astrophysiciens ont proposé deux mécanismes différents pour expliquer l'origine de ces noyaux actifs de galaxies. Le premier est l'œuvre de Martin Rees, de l'Université de Cambridge, et de Roger Blandford, de l'Institut de technologie de Californie. Au début des années 1970, tous deux cherchaient à expli-

quer la forte luminosité des quasars (des milliers de fois celle de la Voie lactée), ainsi que l'origine des «jets radio» spectaculaires qui proviennent de ces objets lointains, donc jeunes : noyaux de galaxies hyperactives, les quasars émettent des jets de matière (visibles dans le domaine radio) qui s'étendent sur des millions d'années-lumière autour des noyaux. M. Rees et R. Blandford supposèrent qu'un

trou noir massif, guère plus grand que le Soleil mais un million de fois plus massif, fournissait à un quasar l'énergie nécessaire à ces émissions de matière.

Les trous noirs n'émettent pas de lumière, mais ils attirent un disque de gaz qui s'échauffe en tombant sur du gaz plus dense. La partie interne du disque, plus chaude, produit des photons dans une large



1. LA GALAXIE MESSIER 82, située à plusieurs millions d'années-lumière de la Terre (a, b), laisse échapper du gaz incandescent de la région proche de son noyau (c). Les astrophysiciens en ont déduit qu'une intense formation d'étoiles à proximité du noyau est responsable de ce bouleversement. L'échauffement et l'émission (de rayons X, en particulier) qui en découlent évacuent le gaz et la poussière du disque galactique. L'activité de la galaxie peut avoir été déclenchée par l'interaction avec sa voisine, la galaxie Messier 81.

bande de fréquence, de l'ultraviolet jusqu'aux rayons X. Une partie de ces photons est absorbée par le gaz environnant, qui émet à son tour de la lumière visible et des ultraviolets. Dans les années qui suivirent la formulation de l'hypothèse de M. Rees et R. Blandford, les astrophysiciens ont compris que l'énergie des galaxies actives les plus proches provenait de trous noirs possédant de tels disques d'accrétion.

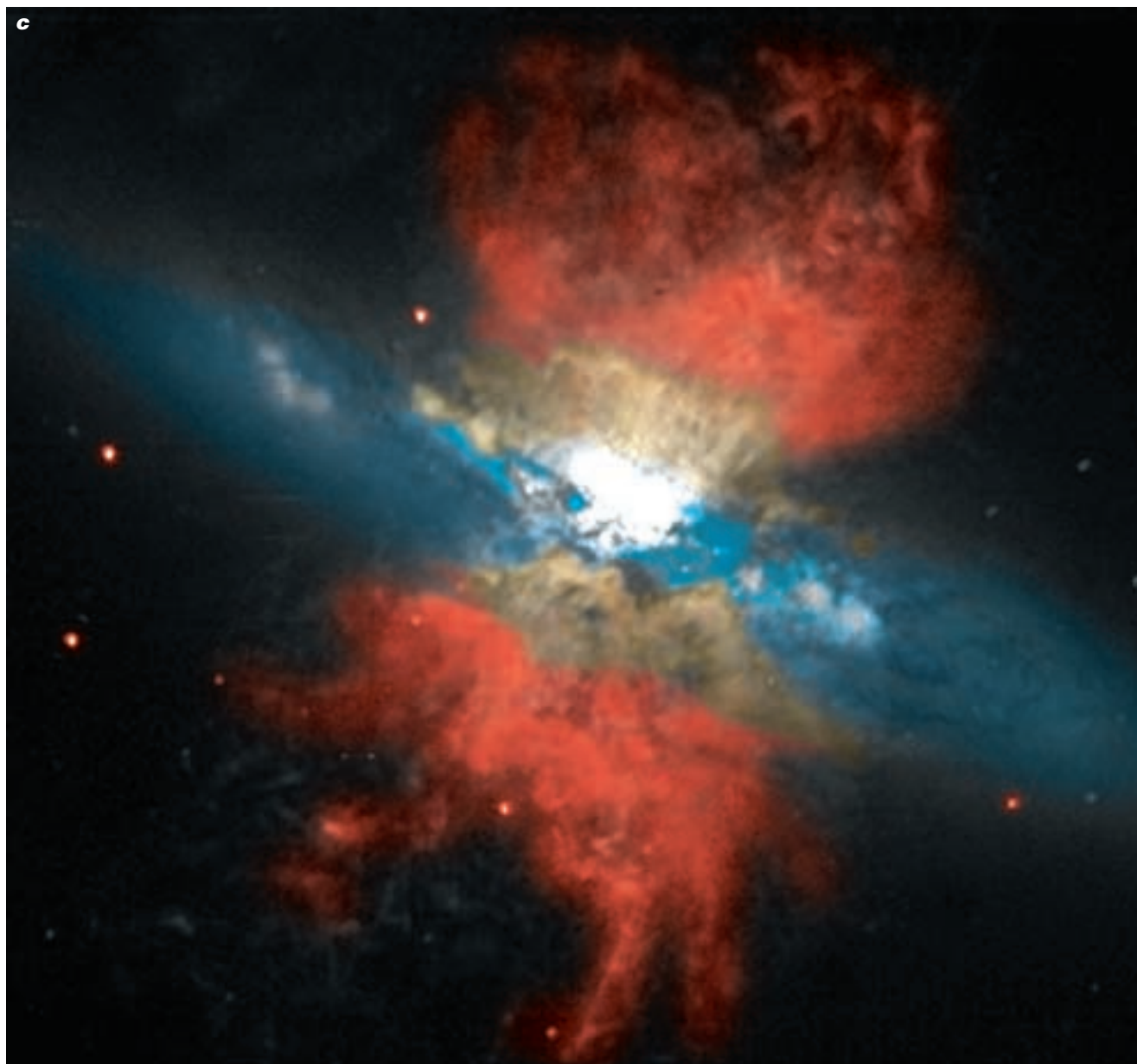
À mesure que le disque s'échauffe, le gaz avoisinant est chauffé à des températures de plusieurs millions de degrés. En se dilatant, il s'éloigne rapidement du noyau galactique. Ce flot de matière, analogue aux vents stellaires à une échelle bien supérieure, repousse le gaz interstellaire loin du

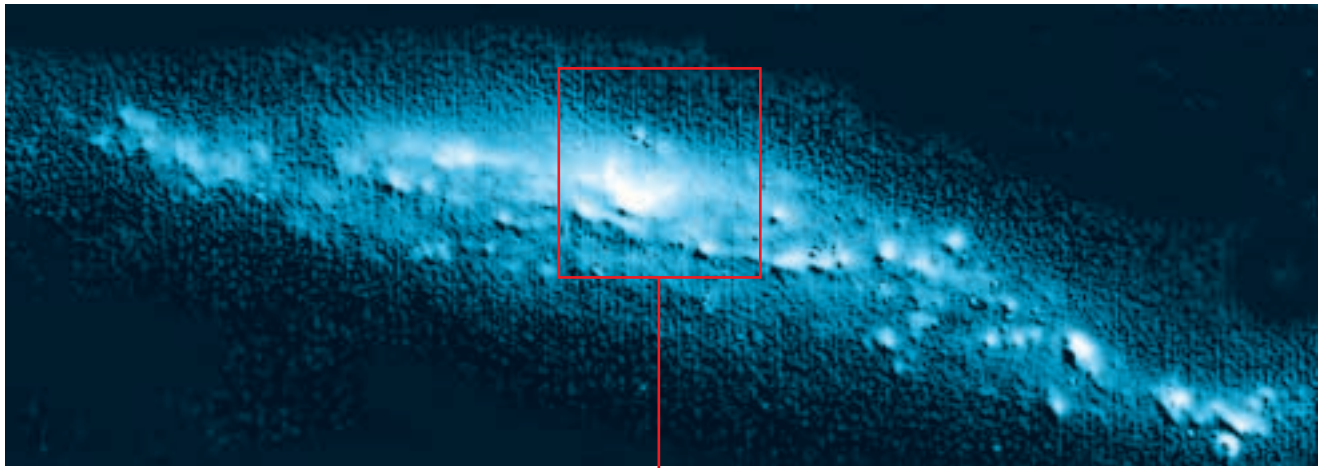
noyau. Les ondes de choc qui en résultent couvrent plusieurs milliers d'années-lumière (ce qui est comparable aux tailles visibles des galaxies elles-mêmes) et sont étudiées à partir des observatoires spatiaux ou terrestres. Certaines de ces galaxies engendrent également des jets radio ; ceux-ci sont des filaments gazeux, très rapides, qui émettent des ondes radio en traversant le champ magnétique, parfois ancré au disque d'accrétion.

Les trous noirs ne sont pas les seules sources d'événements galactiques violents. Certaines galaxies connaissent de brefs épisodes de formation stellaire intense dans leurs cœurs. Les nouveaux astres émettent alors de puissants vents stellaires. Puis, lorsque les étoiles vieillissent, elles dispersent leur matière

lors des supernovae ; cette matière, éjectée à grande vitesse, percute alors la poussière et le gaz interstellaires environnants, ce qui les chauffe à des millions de degrés.

En se dilatant, la bulle formée par le gaz chaud pousse, tel un piston, les poussières et le gaz froids du milieu interstellaire, qui s'accumulent en une coquille dense en surface de la bulle, ralentissant sa vitesse d'expansion. Près de cette coquille, à la frontière entre le flot de gaz en expansion à grande vitesse dans la bulle et le milieu interstellaire non perturbé (quasi stationnaire), une zone de turbulence est visible de la Terre. Si l'énergie de la bulle est suffisante, la perturbation dépasse les limites du disque gazeux galactique et éjecte les fragments de



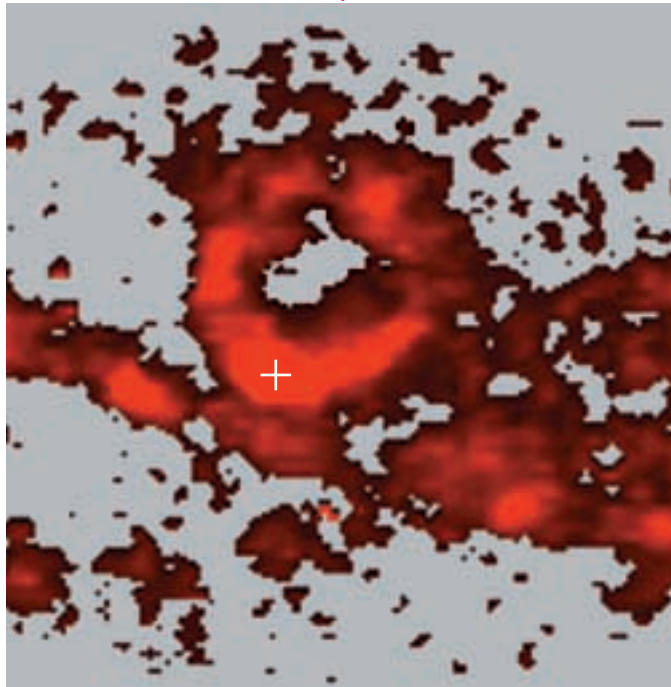


la coquille ainsi que le gaz chaud dans le halo galactique et au-delà, à des milliers d'années-lumière de leurs origines.

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.

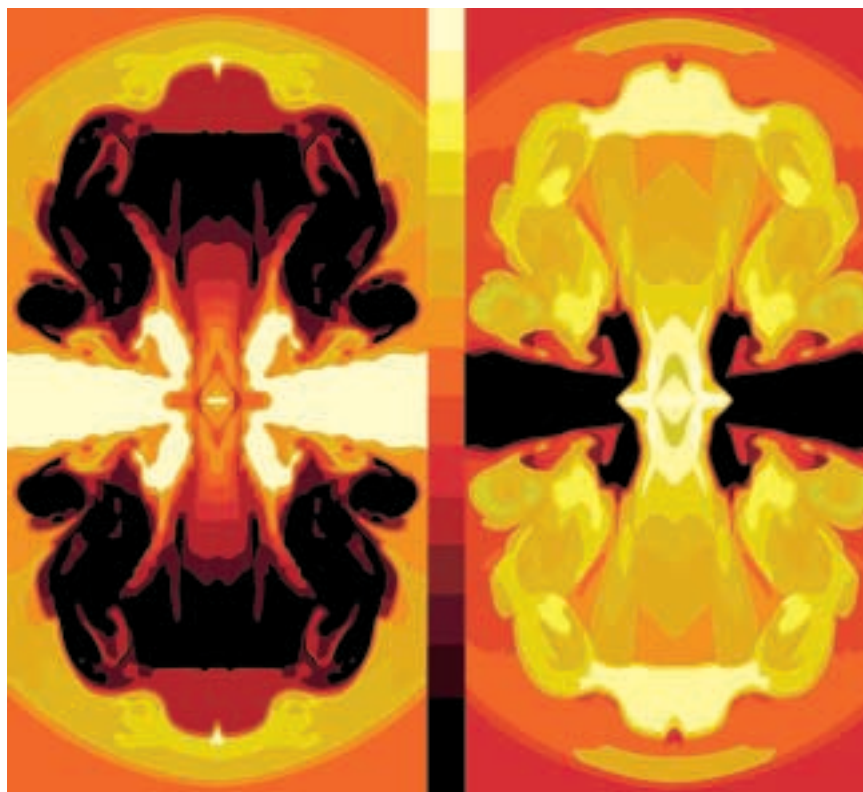
Grâce à l'effet Doppler, qui modifie la fréquence et la longueur d'onde de la lumière émise par des sources mobiles, nous déterminons aussi la vitesse du gaz : la lumière émise par le gaz qui s'approche de la Terre est décalée vers la partie bleue du spectre, tandis que celle émise par le gaz qui s'éloigne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

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

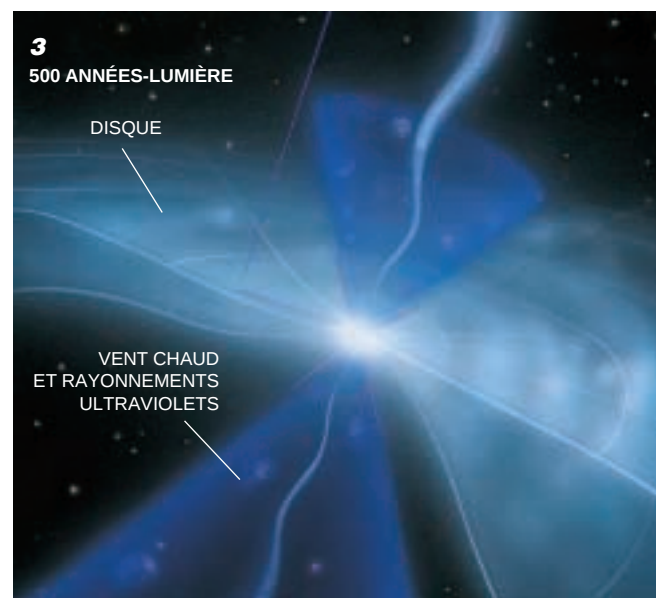
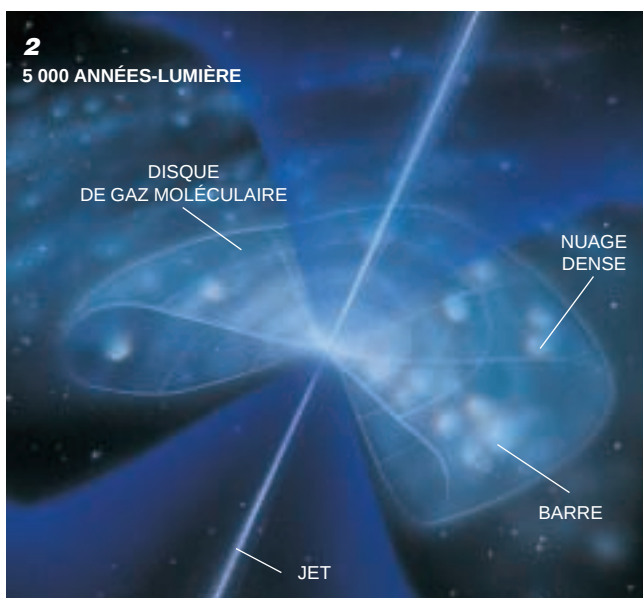
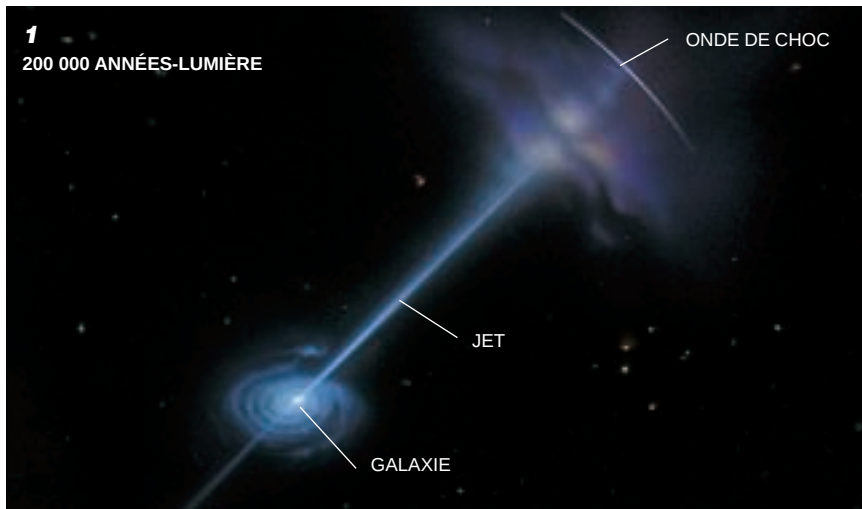
celle de la lumière ; le plasma qui rencontre la matière du disque galactique engendre des «lobes radio» qui émettent d'intenses ondes radio. À l'instar d'un avion supersonique, le bord d'attaque du jet Nord-Est crée un front de choc en forme de V.

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

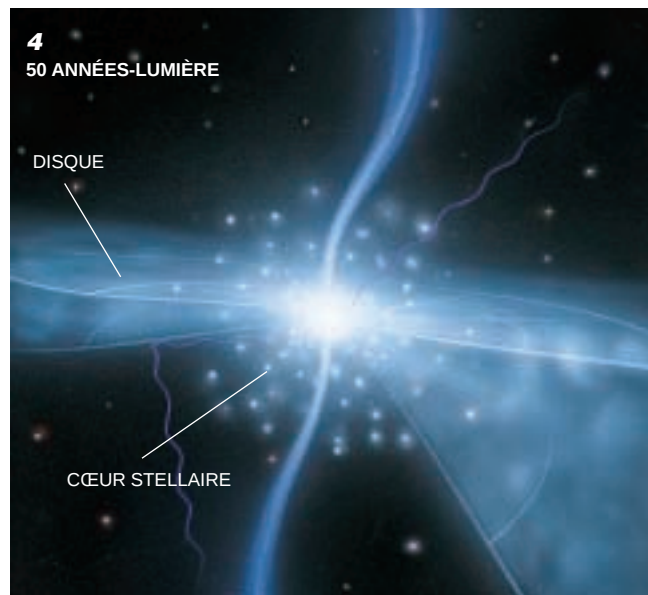
infrarouges et riches en gaz moléculaire, le matériau de base des étoiles. Leur émission radio et leur spectre dans le domaine visible ressemblant à ceux d'un quasar, il est probable qu'un trou noir se trouve en leur sein.

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.

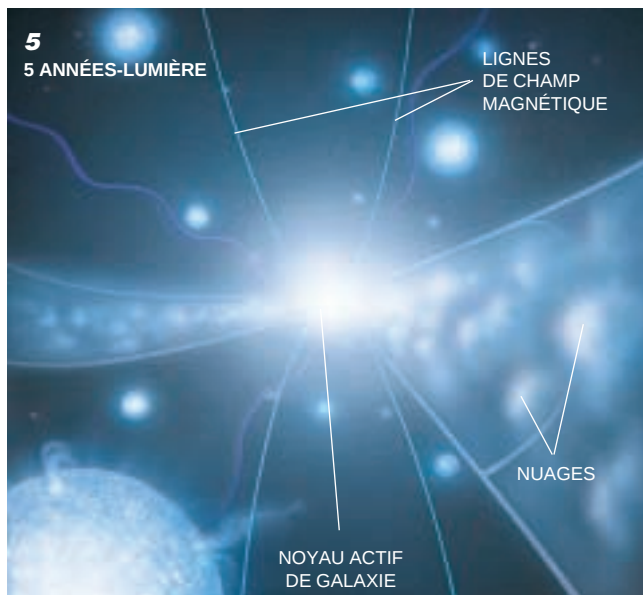
Des images formées par la lumière rouge de l'hydrogène montrent un anneau presque circulaire de 3 600 années-lumière de diamètre à l'Est du noyau ; les mesures de vitesse confirment que cet anneau délimite les bords d'une bulle. L'extrémité pointue de la bulle ovoïde repose sur le noyau, et son grand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

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.

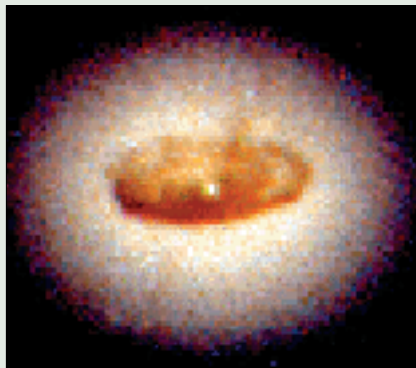
Les puissants flots de gaz visibles dans les galaxies actives qui ont été étudiées ne sont que des exemples remarquables de mécanismes généraux, mais moins violents, qui touchent beaucoup de galaxies. Les galaxies infrarouges lumineuses sont nombreuses, et de plus en plus d'indices conduisent les astrophysiciens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

L'origine bactérienne des ulcères

MARTIN BLASER

La bactérie Helicobacter pylori infecte l'estomac d'une personne sur trois de par le monde ; elle déclenche souvent des ulcères et des cancers.

En 1979, le médecin australien Robin Warren remarqua la présence de bactéries incurvées et spiralées dans des biopsies d'estomacs. Normalement, l'acidité gastrique détruit de tels organismes avant qu'ils ne colonisent l'estomac, mais ceux-là étaient sous l'épaisse couche protectrice de mucus qui tapisse la paroi interne de l'estomac. De plus, les bactéries n'étaient présentes que sur les échantillons de tissus enflammés. Ces micro-organismes étaient-ils responsables de l'inflammation ? Pour le savoir, R. Warren consulta la biblio-

graphie et y découvrit que des anatomopathologistes allemands avaient déjà observé, 100 ans auparavant, de tels organismes. Toutefois, comme ils ne savaient pas faire de cultures de bactéries, leur découverte avait été progressivement oubliée.

R. Warren eut également des difficultés à obtenir des cultures de cette bactérie inconnue.

Il fit

ses premiers essais en 1981, aidé par un jeune étudiant enthousiaste, Barry Marshall. En avril 1982, ils n'avaient toujours pas obtenu de cultures à partir des

