

étoiles dans les bulbes des galaxies spirales et elliptiques actuelles ont un rapport de masse presque constant (environ un pour mille dans les galaxies actuelles).

D'autres projets récents ont révélé de nouveaux indices sur les LIRG et sur la formation des étoiles dans les galaxies en collision. Par exemple, en 2020, en cartographiant le gaz chauffé par les étoiles les plus massives à l'intérieur de ces objets, Kirsten Larson, de l'Institut des sciences des télescopes spatiaux, à Baltimore, et ses collègues ont découvert que la plupart des sursauts de formation d'étoiles dans les LIRG se produisent dans des régions extrêmement denses et énergétiques. Dans ces régions, les taux de formation d'étoiles et les densités de gaz sont au moins dix fois plus importants que dans les galaxies normales. Au début du processus de fusion, les régions de formation d'étoiles les plus actives ont tendance à se trouver sur l'extérieur des LIRG, puis migrent vers le centre à mesure que la fusion galactique progresse.

À la fin des fusions galactiques particulièrement énergétiques, la densité de gaz moléculaire s'approche de celle des nuages moléculaires géants. Par exemple, la galaxie infrarouge ultralumineuse Arp 220 (la plus proche de nous, à 250 millions d'années-lumière) contient l'équivalent de plusieurs fois la Voie lactée de gaz moléculaire concentré dans une région ne dépassant pas 3 000 années-lumière de diamètre, c'est-à-dire une région vingt fois plus petite que le disque gazeux de notre galaxie.

Étonnamment, bien que les fusions de galaxies soient de puissantes usines stellaires, les

amas d'étoiles qui s'y forment ont parfois des durées de vie très courtes. À partir de données du télescope spatial *Hubble*, Angela Adamo, de l'université de Stockholm, et Sean Linden, de l'université du Massachusetts à Amherst, ont montré en effet une chute spectaculaire du nombre d'amas d'étoiles en fonction de leur âge. Ces observations suggèrent qu'un nombre important d'amas d'étoiles sont détruits peu après leur naissance dans les galaxies en cours de fusion, à cause des forces de marée gravitationnelle et des vents des supernovæ (des explosions très puissantes d'étoiles en fin de vie).

DE LA MATIÈRE ÉJECTÉE DE LA ZONE DE COLLISION

La fusion de galaxies elle-même peut être victime de cette rétroaction des supernovæ et des trous noirs centraux. Au début des années 1990, Timothy Heckman, de l'université Johns-Hopkins, et ses collègues avaient découvert des vents puissants composés de gaz ionisés qui s'échappaient de certaines LIRG et ULIRG. Avec les données plus récentes, les astrophysiciens ont montré que les plus rapides de ces « supervents » expulsent du gaz jusque dans l'espace intergalactique. À une échelle plus fine, Anne Medling et Vivian U, de l'université de Californie à Irvine, ont constaté la présence de jets (colonnes de gaz rapides) et de bulles de gaz chaud, émis depuis le noyau galactique vers le reste de la galaxie. Ces phénomènes alimenteraient les supervents.

Mais ces supervents ne contiendraient pas forcément que du gaz chaud. En étudiant le gaz moléculaire dense des supervents, Kazushi

Les sursauts de formation d'étoiles semblent la source prédominante d'énergie des galaxies infrarouges lumineuses, même dans celles qui hébergent des trous noirs supermassifs actifs



Sakamoto, de l'Académie Sinica, à Taïwan, et d'autres collègues du projet *Goals* ont découvert que de grandes quantités de gaz froid s'échappent des galaxies en fusion. Ces flux s'étendent souvent jusqu'à 10 000 années-lumière et transportent parfois plus de gaz que ce qui est transformé en étoiles dans les noyaux galactiques, privant ainsi la galaxie de matière pour alimenter la formation d'étoiles en cours. Les supervents peuvent aussi emporter des métaux (des éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium) et de la poussière dans l'espace intergalactique. Dans presque tous les cas, les flux sortants semblent émerger à proximité du noyau de la fusion galactique, sous l'effet combiné des supernovæ, de la pression de radiation et des jets provenant du trou noir central.

Les supervents joueraient ainsi un rôle important dans le cycle de vie des galaxies, comme le montrent les simulations de Chris Hayward, de l'institut Flatiron, à New York, qui suggèrent que la rétroaction stellaire régule simultanément la formation d'étoiles et les flux s'échappant des galaxies en fusion.

PLACE À UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'INSTRUMENTS

Lancé en décembre 2021, le télescope spatial *James-Webb* élargira considérablement notre compréhension des fusions de galaxies au cours de l'histoire cosmique. Ce télescope infrarouge de 6,5 mètres de diamètre succédera à *Iras*, l'observatoire spatial infrarouge des années 1990, et à *Spitzer*, dont la mission s'est terminée en 2020. *James-Webb* sera au moins cinquante fois plus sensible et aura une résolution spatiale près de dix fois supérieure à celle de *Spitzer*, ce qui permettra d'obtenir des images plus nettes de galaxies dans la partie proche et moyenne du spectre infrarouge. Avec ses spectromètres imageurs capables de produire des centaines de spectres en un seul pointage, il pourra aussi cartographier les régions de formation d'étoiles et les régions autour des trous noirs supermassifs en accréation active dans les fusions galactiques les plus proches.

Dans le cadre du programme scientifique préliminaire du *James-Webb*, la collaboration *Goals* s'intéressera ainsi en particulier à quatre galaxies infrarouges lumineuses proches. D'autres cibles sont aussi prévues, dont des galaxies en cours de fusion avec de puissants sursauts de formation d'étoiles, des trous noirs centraux actifs et des supervents galactiques. Des chercheurs utiliseront par ailleurs l'observatoire pour cibler des galaxies actives proches et lumineuses, des quasars lointains et des champs vides profonds à la recherche des premières galaxies. Dans un deuxième temps, plusieurs projets d'observation ont été sélectionnés pour examiner la rétroaction des jeunes amas d'étoiles et des trous noirs actifs, la fraction de



Le télescope spatial «James-Webb» permettra d'obtenir des images plus nettes de galaxies dans la partie proche et moyenne du spectre infrarouge

la formation d'étoiles qui nous est cachée aux longueurs d'onde optiques et la nature des noyaux obscurs dans les LIRG.

Autre nouveau moyen d'observation, sur Terre cette fois: le *Very Large Array*, un interféromètre radio et à ondes millimétriques, passera de 27 à 263 antennes d'ici à quelques années (le programme scientifique devrait commencer en 2029). Il observera les régions de formation d'étoiles, les trous noirs actifs et la lumière associée aux étoiles explosives, avec une sensibilité et une résolution dix fois supérieures à celles de son prédécesseur.

Ces nouveaux télescopes préciseront les phénomènes astrophysiques qui se produisent lors des fusions de galaxies, aussi bien dans l'Univers actuel que dans les temps les plus reculés. Les simulations de haute résolution couplées à ces nouvelles observations détaillées apporteront de nombreux indices sur la façon dont la rétroaction stellaire régule la formation des étoiles et la croissance des trous noirs dans les galaxies en fusion. De futurs observatoires – déjà prévus ou proposés – détecteront par ailleurs les ondes gravitationnelles émises par les trous noirs supermassifs en collision et les noyaux poussiéreux de galaxies en formation, et ce tout au long d'une grande partie de l'histoire de l'Univers.

Ces informations nous permettent de mieux comprendre comment les galaxies naissent et évoluent, mais éclairent aussi le destin de la Voie lactée et de sa future rencontre avec la galaxie d'Andromède. Cet événement, qui bouleversera notre galaxie, s'accompagnera d'une magnifique flambée de nouvelles étoiles. Un spectacle auquel nous ne pourrions pas assister, mais dont l'Univers nous donne une chance de voir de nombreuses répétitions ailleurs dans le cosmos. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. L. Larson *et al.*, **Star-forming Clumps in Local Luminous Infrared Galaxies**, *The Astrophysical Journal*, 2020.

S. Aalto *et al.*, **Extremely obscured galaxy nuclei – hidden AGNs and extreme starbursts**, *Bulletin of the AAS*, 2019.

S. Linden *et al.*, **Massive Star Cluster Formation and Destruction in Luminous Infrared Galaxies in GOALS**, *The Astrophysical Journal*, 2017.

T. J. Cox et A. Loeb, **The collision between the Milky Way and Andromeda**, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2008.

T. Di Matteo *et al.*, **Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies**, *Nature*, 2005.