

(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), au Chili, ainsi que les télescopes spatiaux européen *Herschel* (infrarouge lointain) et américain *NuSTAR* (rayons X).

Le projet *Goals* a déjà porté ses fruits et considérablement amélioré nos connaissances sur les galaxies en collision. Une question de longue date, par exemple, est de savoir si la lumière des galaxies en fusion provient davantage des sursauts de formation d'étoiles ou des trous noirs actifs. Une façon de distinguer leurs contributions respectives à différents moments du cycle de vie de la fusion galactique est d'examiner les différents profils énergétiques des deux types d'objets, c'est-à-dire la quantité d'énergie libérée en fonction de la longueur d'onde.

D'OÙ VIENT LA LUMIÈRE DES GALAXIES EN FUSION ?

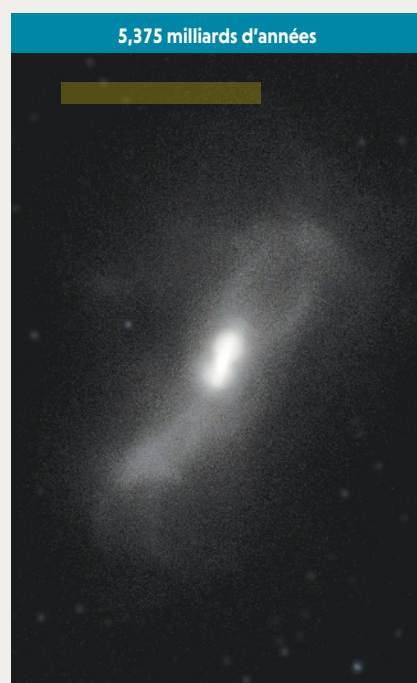
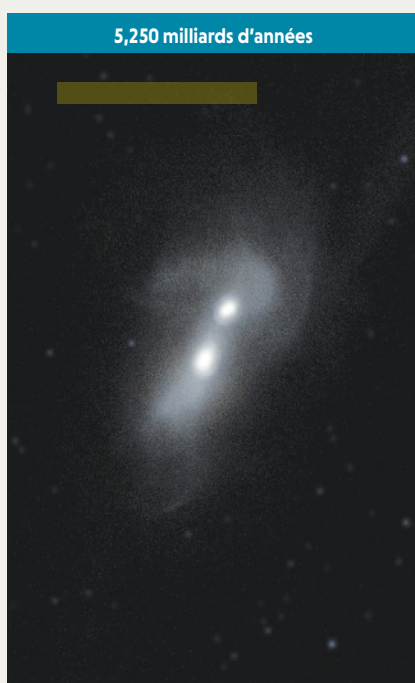
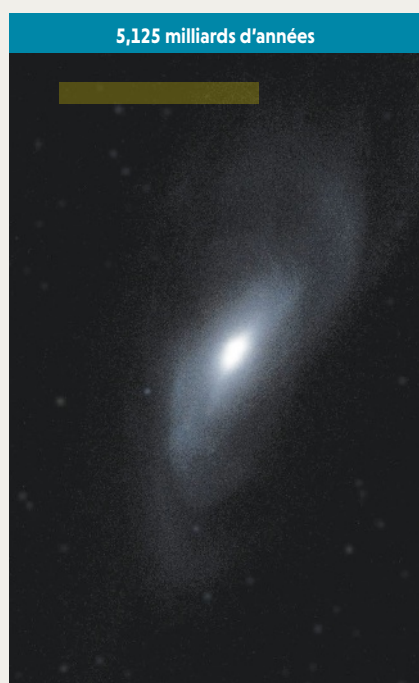
Les étoiles sont de simples sources thermiques de rayonnement : elles émettent la majeure partie de leur énergie à une longueur d'onde maximale qui dépend de leur température, et leur production d'énergie décline très rapidement à des longueurs d'onde plus courtes et plus longues. En revanche, le disque d'accrétion que forme la matière autour d'un trou noir est visqueux et chaud, et sa température augmente de l'extérieur vers l'intérieur. Un disque d'accrétion a donc un profil énergétique beaucoup plus large et produit une fraction beaucoup plus importante de rayonnement à haute énergie qu'une étoile, et il peut chauffer et ioniser un large éventail d'éléments dans le gaz environnant. La découverte d'une émission d'éléments hautement ionisés dans le spectre

d'une galaxie est un signe fort qu'un trou noir supermassif et actif se trouve en son centre.

Nos collègues ont constaté que dans l'ensemble de la population des LIRG, les sursauts de formation d'étoiles semblent être la source prédominante d'énergie, même dans les galaxies infrarouges lumineuses qui hébergent des trous noirs supermassifs actifs (environ un cinquième de la population de LIRG étudiée par *Goals*). Cependant, il est possible que ces données soient incomplètes : les trous noirs au cœur des galaxies pourraient être quasi complètement cachés par la poussière, même en observant dans l'infrarouge.

De plus, nous avons tendance à détecter des trous noirs actifs seulement au cours des derniers stades des fusions de galaxies. Cela suggère qu'une grande partie de la croissance des trous noirs supermassifs est peut-être retardée par rapport au sursaut de formation d'étoiles, ce qui donnerait aux jeunes étoiles plus de temps pour contribuer à l'énergie totale des LIRG. Cependant, grâce à certaines observations dans l'infrarouge à plus haute résolution, Anne Medling, de l'université de Toledo, aux États-Unis, a suggéré au contraire une croissance précoce de certains trous noirs.

De fait, la chronologie précise suivant laquelle les phénomènes de sursauts de formation d'étoiles et les trous noirs supermassifs centraux se développent à l'intérieur des galaxies fait encore l'objet de nombreuses recherches, qui permettront peut-être de comprendre l'un des plus grands mystères de ces deux dernières décennies en astrophysique : pourquoi la masse du trou noir central et des



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

