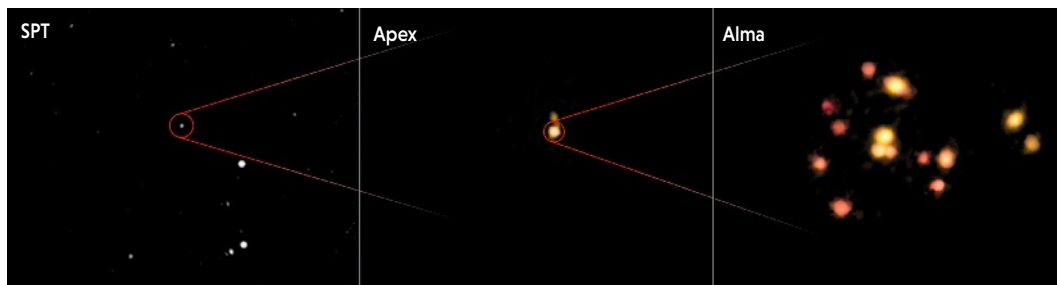


LES PROTOAMAS, LABORATOIRES DE L'EXTRÊME



Comme le souligne Arianna Long, la traque des protoamas a nécessité des instruments performants et des stratégies adaptées. Aujourd'hui, nous commençons à avoir des données, mais il nous reste encore à comprendre ces structures, qui sont de véritables laboratoires de la formation des galaxies dans les conditions les plus extrêmes.

La modélisation des protoamas est particulièrement ardue. En effet, ces objets correspondent à des surdensités très rares de l'Univers : il y en a en moyenne moins d'un seul dans le volume qu'englobent les grandes simulations numériques d'évolutions des galaxies ! De plus, à cause des nombreuses fusions et interactions galactiques dans ces amas, il est nécessaire d'avoir une très bonne résolution pour décrire correctement la physique interne des galaxies. La solution viendra probablement de simulations hybrides qui démarrent en modélisant uniquement la matière noire

à basse résolution, mais sur de grands volumes, et permettent ensuite de zoomer sur une région pour y déterminer la dynamique du gaz cosmique primordial.

La tâche est loin d'être évidente. En effet, les protoamas sont alimentés en gaz à un rythme parmi les plus intenses de l'Univers observable. Nous devons alors comprendre comment ce gaz nourrit les galaxies au cœur de ces amas. Par comparaison, les amas de galaxies dans l'Univers actuel contiennent du gaz chauffé à plusieurs millions de degrés que l'on étudie en rayons X. Les galaxies baignant dans ce gaz chaud sont en général passives. Quand ces conditions se sont-elles mises en place ? Très tôt, ou au contraire étaient-elles totalement absentes dans les protoamas ?

Nous devons aussi comprendre pourquoi la formation d'étoiles est si intense dans ces galaxies. Le gaz pourrait être converti anormalement vite en étoiles à cause des interactions des galaxies. Celles-ci

favoriseraient la compression du gaz et son effondrement pour donner naissance à des astres. Une autre explication plus simple pourrait être que ces galaxies contiennent juste de gigantesques réservoirs de gaz qui s'effondrent sous leur propre poids. Ce processus n'est pas très efficace pour produire des étoiles, mais cela peut être compensé par les volumes de gaz impliqués.

Qui dit formation intense d'étoiles dit aussi mort de nombreux astres massifs qui vivent très peu de temps et explosent en supernovæ. Ces événements cataclysmiques produisent et éjectent de grandes quantités d'éléments lourds, qui changent la composition et la chimie du gaz à l'intérieur et autour des galaxies. Une évolution qui influe sur la formation de nouvelles générations d'étoiles. Enfin, les trous noirs supermassifs hébergés par les galaxies émettent parfois des jets qui vident leurs hôtes de leur gaz, mais qui chauffent aussi le gaz de l'amas dans lequel baignent les galaxies.

S'il reste à élucider ces processus astrophysiques

Les progrès techniques en termes de résolution ont permis, avec *Alma*, de séparer les différentes galaxies d'un amas. Elles étaient vues comme un objet unique par les télescopes *SPT* et *Apex*.

extrêmes, les protoamas que nous connaissons ne remettent pas en cause, pour l'instant, le modèle cosmologique standard. En effet, ils sont à la limite des prévisions en termes de surdensités extrêmes dans l'Univers observable. Toutefois, si l'on trouvait encore beaucoup d'autres protoamas très massifs, le modèle cosmologique pourrait être mis en difficulté. Il faudrait alors être sûr que la détermination de la masse totale des protoamas est correcte, car c'est un exercice difficile et incertain, fondé sur des hypothèses encore peu testées. Il reste donc encore beaucoup à comprendre sur ces métropoles bouillonnantes de l'Univers dans sa prime jeunesse.

MATTHIEU BETHERMIN
Laboratoire d'astrophysique de Marseille

> données suggèrent donc que ces amas sont rapidement arrivés au terme de leur évolution, bien avant l'époque actuelle.

L'étude de ces objets cosmiques est loin d'être terminée. La découverte de ces deux protoamas cachés dans la poussière offre une nouvelle perspective sur l'évolution des amas, mais cette histoire reste incomplète. Une question cruciale est celle de la masse de ces structures. La meilleure façon de « peser » une galaxie consiste à mesurer la quantité de lumière qu'elle émet pour évaluer l'importance de sa population d'étoiles. Cette approche nécessite des données sur l'ensemble du spectre électromagnétique.

Jusqu'à récemment, les observations de protoamas dans l'Univers âgé de moins de 2 milliards d'années s'effectuaient dans des gammes restreintes du visible et de l'infrarouge. En

septembre 2018, mes collègues et moi avons pu observer le DRC dans l'ultraviolet et le visible. Grâce au télescope spatial *Hubble*, l'observatoire *Gemini* et le télescope spatial *Spitzer*, nous avons récolté des informations multispectrales pour calculer la masse de cette structure.

Attendre les données du télescope *Hubble* est rude pour les nerfs. Vous êtes informés du jour où le télescope doit observer le coin du ciel qui vous intéresse, mais vous ignorez quand les données vous seront transmises. Il faut guetter une notification par courriel qui vous prévient que ces précieuses données sont accessibles dans les archives. Le jour où le protoamas DRC était au programme, j'ai probablement consulté ma messagerie toutes les deux minutes...

Le lendemain matin, j'ai sauté du lit pour me précipiter sur mon ordinateur. La livraison des données s'était déroulée quelques heures

après minuit. Alors que les fichiers se téléchargeaient sur mon disque dur, je ne tenais plus en place. Puis j'ai ouvert l'image. Lorsqu'on est la première personne à poser les yeux sur une partie de l'Univers que personne n'a encore jamais vue, on ressent une émotion indescriptible. J'ai d'abord pris un moment pour apprécier la présence de chaque étoile et galaxie sur l'image. Puis je me suis mise au travail.

Le coin de l'image qui m'intéressait est une région riche en activité. Au moins la moitié des galaxies ont une forme irrégulière car elles ont subi, ou subissent encore, des collisions avec des galaxies voisines. Mes collègues et moi avons estimé la population d'étoiles de ces galaxies – avec des résultats spectaculaires, voire problématiques.

En effet, dès cette époque, certaines des galaxies du DRC avaient formé en un temps record trois fois plus d'étoiles que la Voie lactée n'en compte aujourd'hui. Les simulations numériques fondées sur notre compréhension des processus physiques en jeu n'arrivent pas à produire de telles galaxies si tôt dans l'histoire de l'Univers. Modéliser le rythme effréné de la formation d'étoiles dans ces galaxies est difficile, car la physique prévoit que les galaxies devraient se disloquer ou chauffer à tel point qu'elles expulseraient tout le gaz qu'elles contiennent, ce qui ne leur permettrait pas de croître jusqu'aux tailles constatées aujourd'hui.

Le protoamas dans son ensemble est la source d'un second problème : il est lui-même particulièrement massif. Quand j'ai estimé sa masse la première fois, j'ai trouvé le résultat très suspect. J'ai consulté mes collègues pour vérifier mes calculs. Deux semaines plus tard, j'ai présenté mes données à mes collaborateurs. L'un pensait qu'il y avait une erreur dans le code ; un autre m'a demandé si je n'avais pas compté deux fois une composante. (Il y avait bien un petit bug dans mon programme, mais pas assez grave pour expliquer la masse gigantesque de l'amas.) Après maintes vérifications, le résultat semblait solide : le Distant Red Core frôle les limites autorisées dans notre Univers.

La masse d'un amas ne se résume pas à celle des galaxies et du gaz qu'il contient. Il faut ajouter la matière noire, la forme de matière la plus abondante dans l'Univers. Chaque galaxie, et chaque amas, est entourée d'un « nuage » (ou halo) de cette composante de nature inconnue. Et bien que la matière noire soit invisible et mal comprise, elle laisse un signal gravitationnel assez clair pour estimer son abondance (en utilisant diverses techniques astrophysiques).

Nous avons donc estimé la masse de la matière noire du Distant Red Core, et, selon nos simulations, ce protoamas contiendrait presque la quantité maximale possible pour

une telle structure présente aussi précocement dans l'histoire cosmique. Si nous simulons son évolution jusqu'à aujourd'hui, soit pendant 12 milliards d'années, il serait plus large que le plus grand amas de galaxies actuel, El Gordo (« le gros » en espagnol). Même si l'estimation de la quantité de matière noire dans l'amas souffre d'incertitudes importantes, la situation pourrait devenir problématique : nous ne sommes pas certains d'avoir repéré toutes les galaxies qui appartiennent à cet amas. Nous pourrions encore en trouver en dehors du champ de vue de nos observations du DRC. La masse totale pourrait alors être encore plus grande et nous aurions alors des difficultés pour expliquer l'existence d'un tel objet.

REPENSER L'HISTOIRE DES GALAXIES

Notre étude du DRC et la découverte d'autres protoamas du même genre nous obligent à repenser notre compréhension de la formation des amas de galaxies. Nous devons comprendre comment des objets très massifs se sont formés très tôt dans l'Univers. Il nous faut mieux cerner les processus physiques et la chimie de la naissance des étoiles dans les galaxies (voir l'encadré page ci-contre). Mais il faut aussi identifier les conditions de formation des halos de matière noire qui ont servi à amorcer la constitution de galaxies. Ces dernières sont-elles apparues plus tôt qu'on ne le pensait ? Quelles seraient les conséquences sur la formation des éléments ? Ces galaxies auraient-elles produit les ingrédients indispensables à l'émergence de planètes habitables, voire hébergé des formes de vie ?

Certaines de ces questions sont encore largement hors de notre portée, mais les astrophysiciens travaillent dur pour répondre aux autres. Nous poursuivons nos observations sur ces protoamas à travers tout le spectre électromagnétique. Nous développons des méthodes innovantes pour découvrir d'autres protoamas. Avec plus d'exemples, nous pourrions voir si des amas ayant des caractéristiques semblables à celles du DRC sont exceptionnels ou fréquents. Les astronomes et les théoriciens constituent de nouvelles collaborations pour percer le mystère de la naissance des protoamas très denses présentant des taux de formation d'étoiles extraordinaires.

La meilleure façon d'éprouver les modèles est de les faire trembler en portant notre regard sur les situations les plus extrêmes. Serons-nous d'ici à quelques années à même d'expliquer les caractéristiques de ces protoamas ? En mettant au défi notre compréhension de la naissance des étoiles et des galaxies dans l'Univers primordial, nous ne pouvons qu'affiner notre vision du cosmos et de son histoire. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. S. Long et al., **Emergence of an ultrared, ultramassive galaxy cluster core at $z = 4$** , *The Astrophysical Journal*, vol. 898(2), article 133, 2020.

D. Coe, **Pleins feux sur les premières galaxies**, *Pour la Science*, n° 496, pp. 60-68, février 2019.