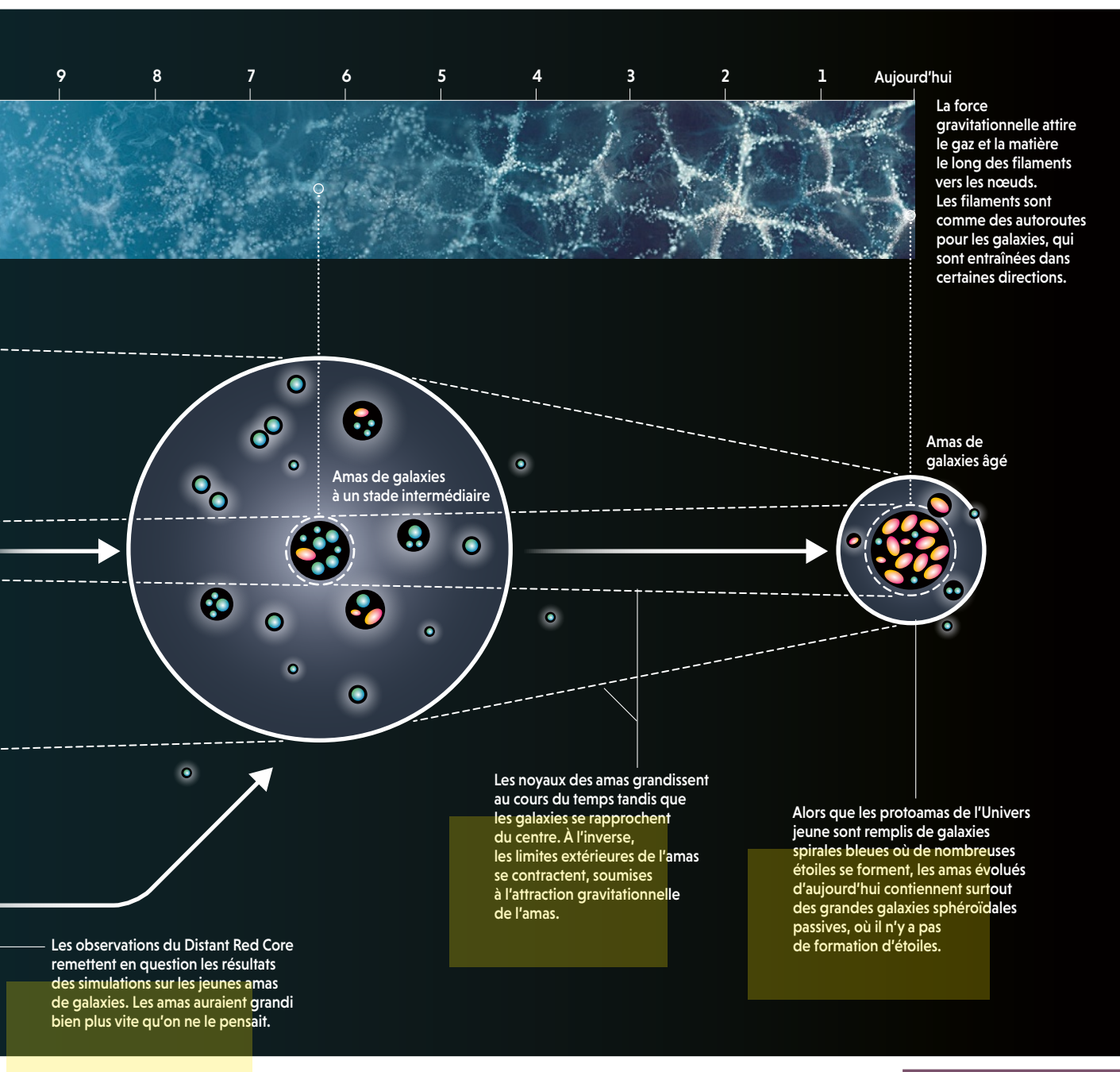




En 2018, deux équipes indépendantes ont utilisé *Alma* pour étudier les objets les plus lumineux en infrarouge qu'ils pouvaient trouver dans l'Univers lointain. Elles ont chacune découvert un ensemble de galaxies poussiéreuses à flambées d'étoiles qui étaient considérées comme des entités uniques dans les données de la première génération de télescopes infrarouges. Ainsi, SPT2349-56 est un groupe de 14 galaxies, et le Distant Red Core (DRC) rassemble 10 galaxies. Ces deux protoamas se trouvent dans l'Univers alors vieux d'à peine 10% de son âge actuel. On y observe une formation intense d'étoiles – chaque

groupe convertit 10000 fois plus de gaz en étoiles par an que ne le fait la Voie lactée – dans un volume correspondant à la moitié de la taille du groupe Local (qui comprend la Voie lactée, la galaxie d'Andromède et plusieurs autres petites galaxies).

Nos estimations de la quantité de gaz contenu dans ces protoamas indiquent qu'avec un tel rythme de formation d'étoiles, leurs galaxies ont épuisé leurs ressources en quelques centaines de millions d'années, devenant ainsi des galaxies elliptiques massives et passives que l'on retrouve dans les amas de l'Univers actuel. Comme nous le pensions, ces ➤

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.

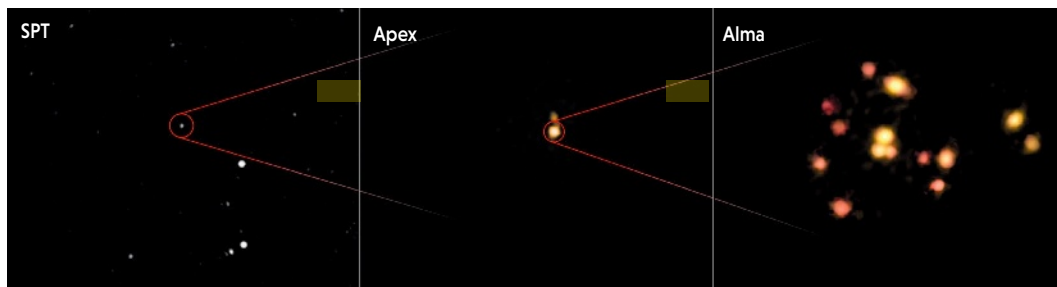
Qui dit formation intense d'étoiles dit aussi mort de nombreux astres massifs qui vivent très peu de temps et explosent en supernovæ. Ces événements cataclysmiques produisent et éjectent de grandes quantités d'éléments lourds, qui changent la composition et la chimie du gaz à l'intérieur et autour des 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