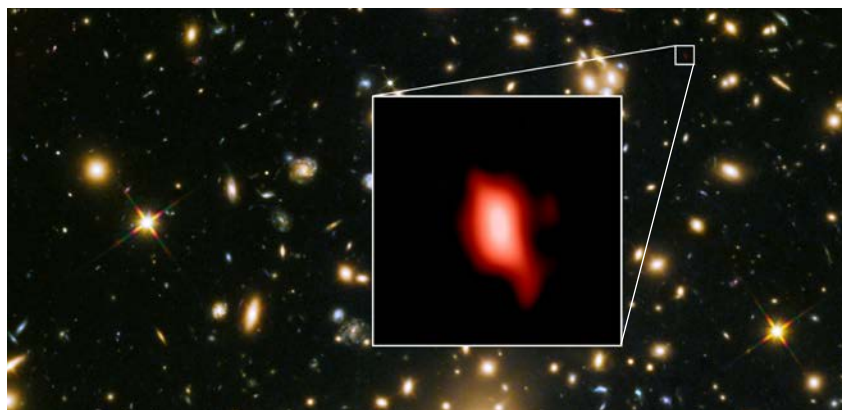


LES PREMIÈRES GALAXIES VERS 200 MILLIONS D'ANNÉES APRÈS LE BIG BANG



Grâce à l'amplification de la lumière par une lentille gravitationnelle, l'observatoire *Alma* a observé le contenu en oxygène (en rouge, dans le zoom) de la galaxie lointaine MACSJ1149-JD1.

Déterminer à quelle époque les premières galaxies se sont formées est un des défis de l'astronomie moderne.

Pour y parvenir, les chercheurs suivent deux stratégies. L'une consiste à simuler l'histoire de l'Univers au moyen d'ordinateurs très puissants, l'autre est de tenter de repousser toujours plus loin les frontières de l'Univers observable, grâce aux grands télescopes.

D'après les simulations numériques décrivant la formation des galaxies et des grandes structures dans l'Univers primordial, les galaxies se seraient formées au sein de grands nuages (ou halos) de matière noire assez massifs (d'environ 10^{12} fois la masse du Soleil) où des étoiles seraient nées à un rythme élevé. Or, du fait de la croissance progressive des halos, ces derniers n'ont atteint la taille nécessaire qu'à partir de 200 millions d'années après le Big Bang.

À partir de ce moment, les premières étoiles auraient émis surtout de la lumière ultraviolette. Mais, du fait de l'expansion de l'Univers, ce rayonnement a subi un décalage vers des longueurs d'onde plus grandes et nous parvient sur Terre dans l'infrarouge proche. Or actuellement, aucun instrument, au sol ou dans l'espace, ne permet d'étudier avec une bonne résolution ce domaine de longueurs d'onde. Il est donc difficile de confirmer quand les toutes premières galaxies se sont formées.

Les galaxies les plus lointaines connues à ce jour (UDFj-39546284 et GN-z11) ont été repérées avec le télescope spatial *Hubble* à une longueur d'onde

de 1,6 micromètre, ce qui correspondrait à une lumière émise environ 400 millions d'années après le Big Bang. Elles sont donc un peu plus anciennes que la galaxie SPT0615-JD évoquée par Dan Coe.

S'il est impossible, pour l'instant, d'observer directement la naissance des premières galaxies, on peut estimer la période à laquelle elles se sont formées. Pour ce faire, on détermine l'âge de l'Univers où l'on observe une galaxie lointaine, grâce au décalage vers le rouge de sa lumière, puis on estime l'âge des plus vieilles étoiles qu'elle contient. Les étoiles âgées émettent surtout de la lumière dans le domaine optique, qui

En analysant la lumière émise par les étoiles vieilles, nous avons estimé quand la galaxie est née

nous parvient dans l'infrarouge, du fait de l'expansion de l'Univers. Or l'atmosphère terrestre est opaque au rayonnement infrarouge, il est donc nécessaire d'aller dans l'espace. L'observatoire spatial *Spitzer* est le télescope le plus performant, à ce jour, pour étudier le rayonnement infrarouge. Cependant, sa sensibilité limite la détection aux galaxies les plus brillantes. Ainsi, cette technique ne s'applique qu'aux galaxies les plus massives ou à celles dont la lumière a été fortement amplifiée par l'effet de lentille gravitationnelle.

Grâce à cette approche, nous avons récemment découvert l'une des galaxies les plus lointaines connues à ce jour, MACSJ1149-JD1, que nous observons telle qu'elle était quand l'Univers était âgé de 550 millions d'années (près de 4% de son âge actuel). Cette galaxie repérée sur les images du télescope spatial *Hubble* comporte 1000 fois moins d'étoiles que la Voie lactée. Elle est cependant dix fois plus brillante qu'elle n'est réellement, en raison de la présence de l'amas de galaxies MACSJ1149+2223 le long de la ligne de visée, qui agit comme une lentille gravitationnelle. Grâce, avec le *VLT* et *Alma*, à la mesure précise du décalage spectral de cette galaxie, et à celle de la quantité de lumière reçue en infrarouge, mes collègues et moi avons estimé quand la galaxie est née. Nous avons estimé que la formation de la galaxie remonte à environ 260 millions d'années après le Big Bang.

L'étude de MACSJ1149-JD1 constitue la première preuve observationnelle de l'existence des galaxies à une époque en accord avec celle prédite grâce aux simulations numériques.

Le futur télescope spatial *James-Webb Space Telescope*, qui sera lancé en mars 2021, repoussera les limites de nos observations. Grâce à la haute sensibilité des détecteurs infrarouges du télescope et la grande taille de son miroir (6,5 mètres de diamètre), nous mesurerons l'âge de galaxies encore plus lointaines et repérerons ces galaxies quelques millions d'années seulement après leur formation.

NICOLAS LAPORTE

University College, Londres, Royaume-Uni

➤ J'avais trouvé ces amas dans un catalogue constitué en 2015 par les chercheurs travaillant sur les données de l'observatoire spatial *Planck*, de l'Agence spatiale européenne. Le projet *Planck* est surtout connu pour ses cartes globales et détaillées du fond diffus cosmologique, le premier rayonnement émis dans l'Univers, alors âgé de seulement 380 000 ans. Mais les données de *Planck* ont aussi contribué à établir un catalogue de plus de 1 000 amas galactiques massifs, révélés par les distorsions qu'ils provoquaient dans les cartes du fond diffus.

UN PROGRAMME AMBITIEUX

La plupart de ces amas étaient déjà connus, mais beaucoup ont aussi été découverts par ce biais. Je me suis ainsi aperçu que l'amas le plus massif du catalogue, Abell 2163, n'avait été observé par *Hubble* qu'en longueurs d'onde visibles, et pas dans l'infrarouge proche. Le deuxième amas le plus massif (PLCK G287.0+32.9, découvert par *Planck*) constituait une excellente lentille gravitationnelle, mais *Hubble* n'avait pas encore tourné son regard vers lui.

J'ai ainsi dressé une liste de 41 amas massifs qui n'avaient pas été observés dans l'infrarouge proche, et, avec des collègues, nous avons rédigé une proposition d'observation. Nous avons demandé à utiliser *Hubble* sur l'équivalent de 5% de son temps réservé aux projets de cette année-là, ce qui correspondait à plus de 100 heures d'observation. Mais notre proposition était loin d'être la seule à avoir été soumise, et la compétition était rude. Des astronomes du monde entier se sont réunis à Baltimore pour décider des projets à retenir. En juin 2015, notre demande a été acceptée, un des plus gros programmes d'observation des 23 années d'exploitation de *Hubble*.

Le relevé *Relics* a observé chacun des 41 amas avec le détecteur infrarouge de la caméra WFC3/IR (*Wide Field Camera 3*). Nous les avons aussi observés dans le visible (si cela n'avait pas déjà été fait) à l'aide de la caméra ACS (*Advanced Camera for Surveys*). Les images à plus haute résolution de l'ACS nous ont aidés à mesurer les propriétés de la lentille gravitationnelle de chaque amas et à estimer le grossissement des lointaines galaxies découvertes dans les images de WFC3/IR. Nous avons observé à sept longueurs d'onde différentes comprises entre 400 et 1 700 nanomètres. En examinant des caractéristiques connues de la lumière, comme la longueur d'onde précise qu'absorbe l'hydrogène neutre (dans lequel baignent les galaxies de l'Univers jeune), nous sommes en mesure d'estimer de combien la lumière de la galaxie a été décalée vers le rouge, et donc d'estimer l'éloignement de la galaxie.

On nous a également alloué 945 heures de temps de télescope sur *Spitzer*. Ses données

dans l'infrarouge fournissent un recensement plus complet des étoiles dans les premières galaxies, nous permettant de mesurer leur masse stellaire et aussi de confirmer les estimations de distance obtenues grâce à *Hubble*.

En 2017, Brett Salmon a découvert la galaxie SPT0615-JD dans les données du relevé *Relics*, une galaxie particulièrement rouge. Le caractère unique de cette galaxie n'était pas évident au premier coup d'œil. En effet, les galaxies peuvent paraître rouges pour diverses raisons. Certaines ont un fort décalage vers le rouge car elles sont très lointaines. Mais d'autres sont enveloppées de nuages de poussière, qui absorbent la lumière bleue et la réémettent sous la forme de rayon-



La galaxie SPT0615-JD date de l'époque où l'Univers avait moins de 500 millions d'années



nement infrarouge, ce qui fait paraître les galaxies plus rouges qu'elles ne le sont vraiment. Et d'autres galaxies n'ont pas formé beaucoup de nouvelles étoiles, et les astres qui y restent sont des étoiles rouges de longévité importante. Les galaxies rouges peuvent aussi être une combinaison de tout cela: décalées vers le rouge, poussiéreuses et vieilles.

Les observations du télescope *Spitzer* entre 3 et 5 micromètres de longueur d'onde sont très utiles pour nous aider à distinguer les galaxies lointaines décalées vers le rouge des galaxies intrinsèquement rouges, qui apparaîtraient encore plus brillantes dans les données de *Spitzer*. Nous avons initialement découvert trois galaxies (dont SPT0615-JD) dans les images de *Hubble* qui semblaient avoir un décalage vers le rouge (noté z) d'environ 10, datant de l'époque où l'Univers avait moins de 500 millions d'années, soit il y a plus de 13 milliards d'années. Mais l'analyse des observations de *Spitzer* a révélé que deux d'entre elles avaient plutôt un décalage vers le rouge d'environ 2, correspondant à l'époque où l'Univers avait déjà 3 milliards d'années (presque un quart de son âge actuel). La galaxie SPT0615-JD a survécu à l'analyse de *Spitzer*, et est restée un candidat probable à $z=10$.

Ce résultat a été obtenu en combinant l'analyse sur les données de *Hubble* de Brett Salmon

LE DÉCALAGE VERS LE ROUGE OU REDSHIFT

Lorsqu'une source s'éloigne de l'observateur (parce qu'elle se déplace ou parce que l'Univers est en expansion), les longueurs d'onde de sa lumière sont augmentées, et ainsi décalées vers le rouge. Si λ_0 est la longueur d'onde émise par la source, et λ_{obs} celle mesurée par un télescope, on définit le redshift :

$$z = \frac{(\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0)}{\lambda_0}$$

Dans le cas de l'expansion de l'Univers, le redshift est relié aux distances dans le cosmos.