

et une analyse sur celle de *Spitzer* par Victoria Strait, de l'université de Californie à Davis. Nous avons trouvé que le spectre lumineux de SPT0615-JD diminue à partir de 1,34 micromètre, et aucune lumière de longueur d'onde inférieure n'a été détectée en provenance de cette source. Cette part manquante du spectre s'explique par le fait que les atomes d'hydrogène du gaz dans l'Univers primordial ont absorbé cette lumière et se sont ionisés en perdant leur électron. La rupture brutale dans le spectre de SPT0615-JD nous permet de mesurer la distance de l'objet. Bien que nous observions ce décrochement autour de 1,34 micromètre, nous savons que l'hydrogène neutre s'ionise en absorbant de la lumière de longueur d'onde inférieure à 0,1216 micromètre. La différence provient du décalage vers le rouge lié à l'expansion de l'Univers. Nous observons SPT0615-JD à un décalage vers le rouge de 10, c'est-à-dire quand l'Univers n'avait que 3,5% de son âge actuel.

Cette datation fait de SPT0615-JD l'une des plus anciennes galaxies que nous connaissons.

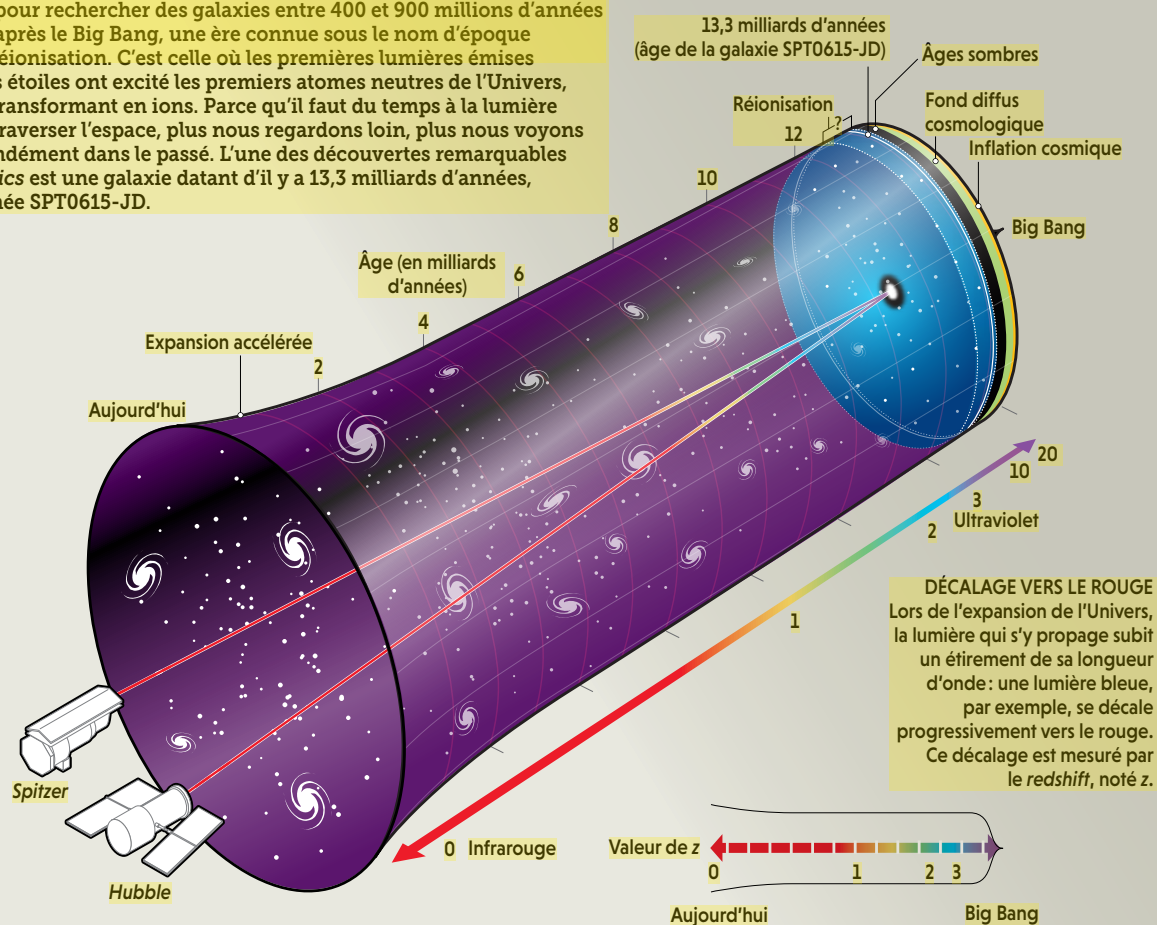
On connaît deux autres galaxies légèrement plus lointaines, observées quand l'Univers avait 400 millions d'années (voir l'encadré page 65). Mais dans les images de *Hubble*, ces galaxies sont de simples points infrarouges, trop petits pour discerner le moindre détail de leur structure interne. La galaxie SPT0615-JD est spéciale: sa lumière a été étirée et amplifiée par un effet de lentille gravitationnelle, ce qui nous offre l'aperçu le plus détaillé à ce jour d'une galaxie aussi ancienne.

Les observations de cette galaxie sont loin d'être terminées. D'après Rachel Paterno-Mahler, de l'université de Californie à Irvine, nous devrions voir des images multiples (bien que très pâles) produites par l'effet de lentille gravitationnelle, ce qui n'a pas encore été le cas.

Nous avons aussi un programme d'observation de cette galaxie avec *Alma* (*Atacama Large Millimeter Array*, grand réseau d'antennes millimétriques de l'Atacama), dont nous attendons qu'il confirme notre mesure de la distance et qu'il y observe la présence d'oxygène, ce qui ➤

CHRONOLOGIE COSMIQUE

Le relevé *Relics* a utilisé les télescopes spatiaux *Hubble* et *Spitzer* pour rechercher des galaxies entre 400 et 900 millions d'années après le Big Bang, une ère connue sous le nom d'époque de la réionisation. C'est celle où les premières lumières émises par les étoiles ont excité les premiers atomes neutres de l'Univers, les retransformant en ions. Parce qu'il faut du temps à la lumière pour traverser l'espace, plus nous regardons loin, plus nous voyons profondément dans le passé. L'une des découvertes remarquables de *Relics* est une galaxie datant d'il y a 13,3 milliards d'années, nommée SPT0615-JD.



➤ constituerait la détection la plus ancienne d'un élément aussi lourd. Et nous allons proposer des observations avec le prochain observatoire vedette de la Nasa, le *JWST* (*James-Webb Space Telescope*). Nous espérons alors obtenir des images détaillées de la dynamique interne de la galaxie, mesurer sa contribution à la réionisation et déterminer sa composition chimique, à savoir s'il s'agit uniquement d'hydrogène et d'hélium ou si la galaxie est déjà enrichie en éléments plus lourds.

La galaxie SPT0615-JD a été la découverte la plus remarquable de *Relics*, mais nous avons trouvé près de 300 autres galaxies dans le premier milliard d'années de l'Univers, dont l'ancienneté reste à confirmer. Parmi elles se trouvent les galaxies les plus brillantes datant de ces temps anciens, ce qui nous permettra de les étudier en détail.

LE CHAPITRE MANQUANT DE L'HISTOIRE COSMIQUE

Les galaxies anciennes que nous trouvons grâce à *Relics* nous aident à remplir une des pages blanches du grand livre de l'histoire du cosmos. Dans le cadre du modèle standard cosmologique, l'Univers a débuté par un Big Bang suivi aussitôt d'une période d'inflation durant laquelle l'espace a gonflé à grande vitesse. Environ 380 000 ans après sa naissance, l'Univers s'est assez refroidi pour que les premiers atomes se forment et que la lumière se propage librement. Nous voyons aujourd'hui les traces de cet épisode avec le fond diffus cosmologique.

Mais après, l'histoire de l'Univers souffre d'un trou de près de 400 millions d'années. Nous n'avons jamais observé le moindre objet correspondant à cette période. Ces 3% de l'histoire cosmique nous sont inconnus. Mais nous savons qu'il s'y est passé beaucoup de choses. Les premières étoiles se sont formées peut-être 100 millions d'années après le Big Bang. Ensuite, nous pensons que les étoiles ont commencé à s'agglutiner et à former *in fine* les premières galaxies. La lumière de ces galaxies a commencé à bombarder les atomes d'hydrogène environnant, les ionisant et libérant leurs électrons.

Comprendre comment ce processus s'est déroulé en étudiant ces galaxies est crucial pour remplir les pages manquantes de l'histoire de nos origines. Le relevé *Relics* et les projets qui l'ont précédé (comme *Clash*, *Candels* et *Frontier Fields*) avancent à grands pas, mais nous attendons un véritable bond en avant avec le *JWST*, qui prendra son envol en 2021. Cet observatoire spatial sera l'outil le plus puissant de l'humanité pour sonder les temps les plus reculés. Équipé d'un plus grand miroir, sensible à des longueurs d'onde plus importantes que les télescopes précédents, il verra des galaxies plus lointaines et moins

brillantes avec une meilleure résolution. Et il sera capable de déterminer la masse et la composition de ces galaxies, ainsi que leur contribution à la réionisation.

Les lentilles gravitationnelles nous ont été d'une aide précieuse pour découvrir des galaxies lointaines avec les télescopes existants, et je ne doute pas que cette stratégie, combinée à la puissance du *JWST*, poussera les découvertes encore plus loin, jusqu'à des décalages vers le rouge encore plus grands.

Les premières étoiles se seraient formées 100 millions d'années après le Big Bang

Plus nous regardons loin dans le passé, plus nous constatons que les petites galaxies y représentent une part importante du total. Si cette tendance se poursuit dans les 400 premiers millions d'années, l'avantage que confèrent les lentilles gravitationnelles n'en sera que multiplié. Sur la base des estimations actuelles, je pense que les lentilles seront la clé de la découverte des toutes premières galaxies avec le *JWST*.

Ce télescope spatial verra sûrement des galaxies à 300 millions d'années après le Big Bang, et, avec les lentilles gravitationnelles, nous espérons voir des galaxies dans l'Univers âgé de moins de 200 millions d'années – si tant est que des galaxies se formaient déjà à une époque aussi reculée.

L'inconvénient du *JWST* est sa durée de vie, entre 5 et 10 ans, qui est relativement courte comparée aux 28 ans de *Hubble*. Le *JWST* aura assez de carburant pour maintenir son orbite pendant une décennie. Et il évoluera à environ 1,5 million de kilomètres de la Terre, soit beaucoup trop loin pour que des astronautes puissent assurer son ravitaillement et son entretien, comme cela a été le cas plusieurs fois avec *Hubble*. Nous devons donc être opérationnels très vite pour traquer les anciennes galaxies. Le relevé *Relics* nous permettra d'optimiser la brève existence du *JWST*, parce qu'il a déjà identifié certaines des galaxies anciennes les plus intéressantes à observer en détail avec ce nouveau télescope, ainsi que les régions du ciel comportant de fortes lentilles, où le *JWST* ne manquera pas de trouver de nouvelles galaxies. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Hashimoto et al., **The onset of star formation 250 million years after the Big Bang**, *Nature*, vol. 557, pp. 392-395, 2018.

B. Salmon et al., **RELICS : a candidate z~10 galaxy strongly lensed into a spatially resolved arc**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 864(1), article L22, 2018.

M. Lemonick, **La fin de l'âge sombre**, *Pour la Science* n° 441, juillet 2014.