

> 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 la 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.

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.

