

> complémentaire de *Hubble* car il est sensible à des longueurs d'onde plus grandes, dans l'infrarouge. Le premier relevé, *Clash* (*Cluster Lensing And Supernova Survey with Hubble*), était un programme de trois ans dirigé par Marc Postman, de l'Institut des sciences du télescope spatial, à Baltimore. Ce projet a observé 25 amas galactiques. J'ai participé à l'analyse des images de ce relevé et, en 2012, j'ai découvert MACS0647-JD, une galaxie observée juste 420 millions d'années après le Big Bang. Elle était alors candidate au titre de la galaxie la plus lointaine connue. Elle a été surpassée en 2016, quand Pascal Oesch, de l'université Yale, a découvert une galaxie 20 millions d'années plus ancienne, cette fois avec le relevé *Candels* (*Cosmic Assembly Near-Infrared Deep Extragalactic Legacy Survey*), une observation par *Hubble* de zones relativement vides du ciel, sans l'aide de lentilles gravitationnelles.

Après les succès du relevé *Clash*, j'ai aidé à convaincre le directeur du télescope *Hubble* de l'époque, Matt Mountain, d'inclure les amas galactiques dans le prochain grand programme d'observation du télescope spatial, nommé *Frontier Fields* et dirigé par Jennifer Lotz, de l'Institut des sciences du télescope spatial. Ce projet suivait les pas des précédents programmes de champs profonds de *Hubble* (tels que *Hubble Deep Field*), qui scrutaient de petites zones du ciel pendant plusieurs jours. Ces premiers projets ciblaient les zones du ciel les plus vides possible, sans lumière brillante de galaxies «proches» (à seulement quelques milliards d'années-lumière de la Terre) qui nous bloqueraient la vue sur l'Univers plus lointain.

La première image du champ profond de *Hubble*, qui combinait 342 expositions réalisées sur dix jours en 1995, fut une révélation : dans une minuscule fraction angulaire de ciel vide, pas plus grande qu'un grain de sable tenu à bout de bras, nous avons découvert quelque

3 000 galaxies. Par la suite, le *Champ profond de Hubble Sud* et le *Champ ultra-profond* ont pris le même soin d'éviter les régions comportant des galaxies proches.

Le projet *Frontier Fields* a observé six régions relativement vides, s'inscrivant dans la continuité des précédents programmes de champs profonds. Mais il a aussi rompu avec cette approche en obtenant des images profondes de six régions contenant certaines des plus fortes concentrations de galaxies distantes de 3 à 5 milliards d'années-lumière, afin de profiter d'effets de lentilles gravitationnelles. En amplifiant la puissance de détection de *Hubble* et de *Spitzer* avec les lentilles gravitationnelles, les champs de *Frontier Fields* ont révélé les galaxies les plus petites et les plus lointaines jamais observées.

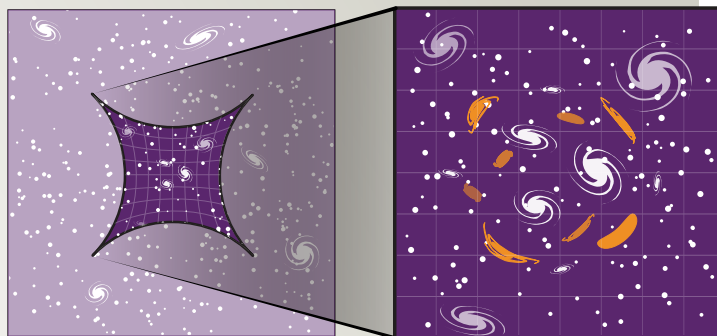
SCRUTER DES AMAS GALACTIQUES

Après *Clash*, et avec *Frontier Fields* en cours, il n'était pas évident que les astronomes approuveraient une nouvelle demande de temps d'observation sur le télescope *Hubble* afin de scruter des amas galactiques. Mais j'avais remarqué que de nombreux amas massifs, récemment découverts, n'avaient jamais été observés par *Hubble* dans l'infrarouge proche, une plage de longueurs d'onde intéressante pour chercher les galaxies lointaines. En effet, à cause de l'expansion de l'Univers, la longueur d'onde de la lumière des objets lointains subit un étirement et augmente : c'est l'effet de *red-shift* ou décalage vers le rouge. Or les étoiles de galaxies jeunes émettraient beaucoup dans l'ultraviolet, un rayonnement qui arriverait jusqu'à nous dans l'infrarouge proche. Ces amas de galaxies constituaient donc de potentielles lentilles que nous n'avions pas encore exploitées pour traquer des galaxies dans l'Univers

>

DEUX STRATÉGIES

Les astronomes adoptent deux approches différentes pour rechercher des galaxies lointaines. La première consiste à observer longtemps une zone apparemment vide du ciel, de façon à collecter de la lumière d'objets peu lumineux. Une autre option est de scruter des zones comportant un amas galactique massif qui joue le rôle de lentille gravitationnelle, ce qui amplifie la lumière venant d'un éventuel objet lointain situé en arrière-plan. Si l'on compare ces deux méthodes, le champ de vision est plus petit dans le cas de la lentille, du fait de l'effet de zoom ; et l'image est déformée. Néanmoins, cette technique est plus efficace pour traquer les premières galaxies.



Zone du ciel comportant un amas galactique massif

Galaxies lointaines apparaissant grâce à l'effet de lentille gravitationnelle

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

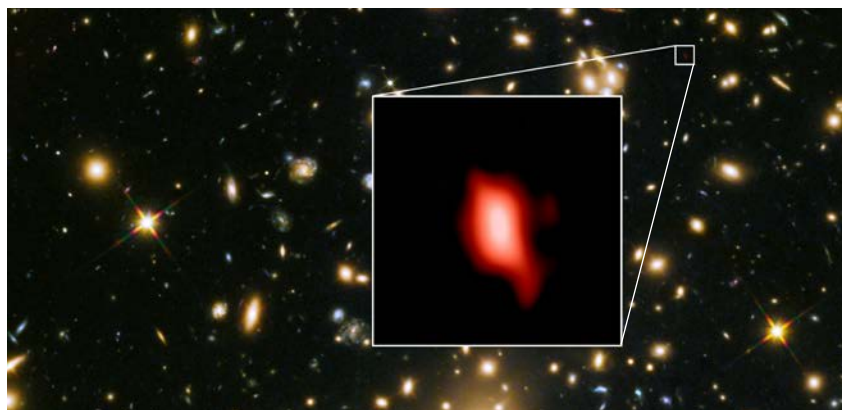
Déterminer à quelle époque les premières galaxies se sont formées est un des défis de l'astronomie moderne.

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



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.

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