

> détecter plus de 300 galaxies remontant au premier milliard d'années de l'Univers.

Ces objets sont fascinants parce qu'ils fournissent un aperçu d'une période de l'histoire cosmique qui nous est encore inconnue. En étudiant ces galaxies, nous espérons comprendre comment les premières d'entre elles se sont formées et ont influé sur l'évolution de l'Univers jeune. Par exemple, nous pensons que les galaxies telles que SPT0615-JD (*voir l'image ci-contre*) ont transformé le contenu de l'espace primordial en émettant des bouffées de rayonnement ultraviolet. Ces émissions de haute énergie ont arraché les électrons des atomes d'hydrogène neutre qui emplissaient l'Univers, les faisant revenir à leur état ionisé initial. On parle de la période de «réionisation», mais les détails de ce processus sont assez mal connus. Avec un peu de chance, les galaxies anciennes que nous commençons à observer nous révéleront de nombreuses informations.

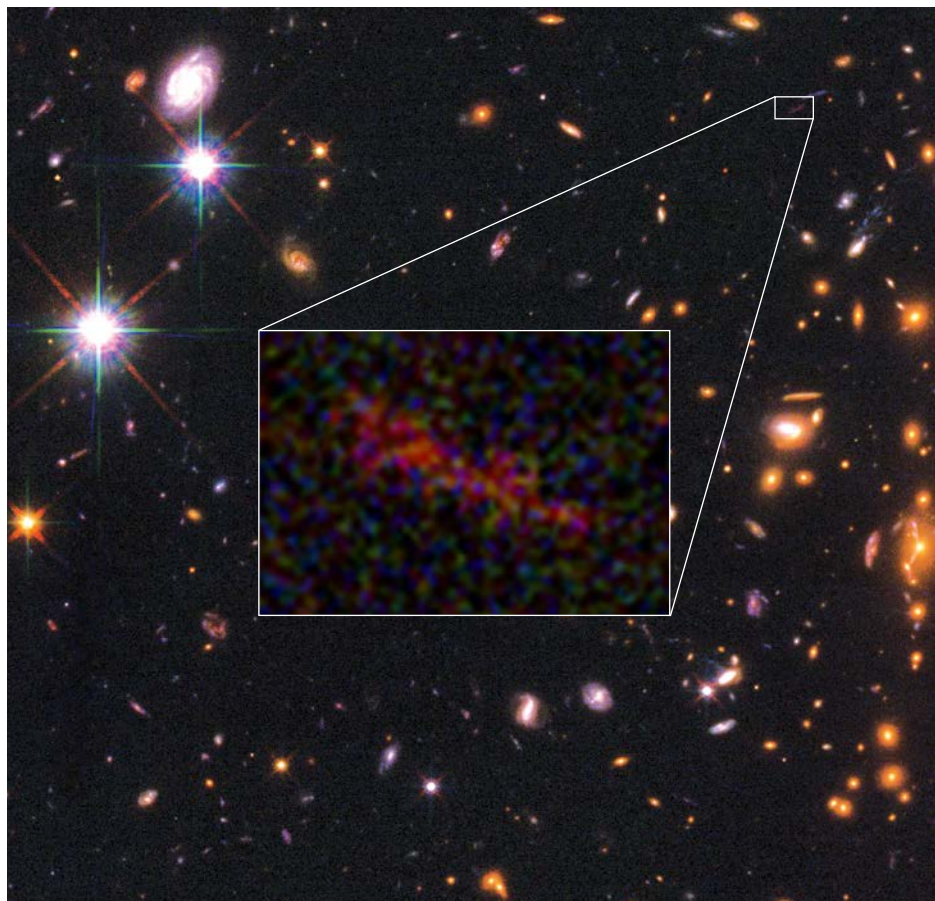
LES PREMIÈRES GALAXIES ÉTAIENT « PURES » ET PETITES

Les galaxies de la première génération ne ressemblaient pas à celles que nous connaissons aujourd'hui. Elles étaient plus «pures», composées presque exclusivement d'hydrogène et d'hélium gazeux. Avec le temps, les étoiles de ces galaxies ont produit, par fusion thermonucléaire, des éléments plus lourds. Puis, quand ces étoiles sont arrivées en fin de vie, elles ont explosé sous la forme de supernovæ, produisant encore d'autres éléments et les dispersant dans l'espace voisin. Elles ont enrichi les galaxies en «matériau stellaire», dont les éléments nécessaires à l'apparition de la vie.

Les premières galaxies ne formaient pas encore de majestueuses spirales ou des boules ellipsoïdales comme les galaxies que nous voyons aujourd'hui dans le voisinage de la Voie lactée. Elles étaient beaucoup plus désordonnées et beaucoup plus petites (ce qui les rend encore plus difficiles à trouver). Les premières galaxies que nous avons vues faisaient environ 1% de la taille de la Voie lactée, mais leur croissance était rapide, et elles formaient de nouvelles étoiles à des vitesses prodigieuses. En effet, le combustible (le gaz hydrogène) était alors présent en abondance, sous la forme de nuages et de «courants froids» capturés par l'attraction gravitationnelle des galaxies.

Par ailleurs, ces dernières entraient souvent en collision les unes avec les autres; ces fusions ont accéléré leur croissance et ont déclenché des flambées de formation stellaire. Avec l'expansion de l'Univers, les fusions de grandes galaxies sont devenues plus rares, les réserves de gaz se sont réduites. La croissance des galaxies s'est peu à peu ralentie.

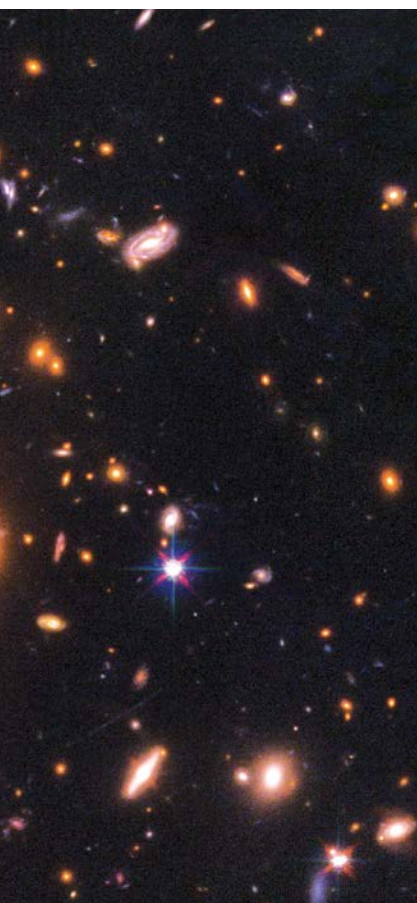
Tel est, dans les grandes lignes, le tableau que nous nous faisons de l'évolution des



galaxies. Nous travaillons encore à y apporter les détails, et de nombreuses questions subsistent, en particulier concernant les époques les plus reculées. Quand les premières galaxies se sont-elles formées? Elles étaient petites, mais quelle était leur taille plus précisément? Quelle forme prenaient-elles? Présentaient-elles toutes une formation stellaire intense, ou certaines étaient-elles plus calmes, comme la plupart des galaxies actuelles? Certaines des premières galaxies ont-elles eu le temps de former des disques comme la Voie lactée, ou bien les fusions étaient-elles trop fréquentes pour que cela se produise? En trouverons-nous qui ne contiennent que de l'hydrogène et de l'hélium, ou les premières supernovæ les ont-elles enrichies très vite en éléments lourds? À quelle vitesse les premières galaxies ont-elles crû en masse et en nombre? Avec les résultats du relevé *Relics*, nous allons explorer cette période et chercher des réponses à toutes ces questions.

Rappelons d'abord que la lumière se déplace à une vitesse finie. Dès lors, regarder loin revient à observer l'Univers dans le passé. Et plus une source lumineuse est lointaine, moins elle est brillante, ce qui rend sa détection plus difficile. Pour y remédier, les membres du projet *Relics* ont utilisé la technique des

Cette tache rouge et floue dans l'image prise par le télescope spatial *Hubble* correspond à la galaxie SPT0615-JD, l'une des plus lointaines connues à ce jour, présente dans l'Univers âgé de moins de 500 millions d'années.



«lentilles gravitationnelles» pour voir très loin dans le passé. En d'autres termes, nous avons mis à contribution les amas galactiques massifs, qui pour nous sont comme des loupes naturelles. Ces groupes de galaxies ont une masse combinée telle qu'ils courbent de façon importante l'espace-temps, en accord avec les prédictions de la théorie de la relativité générale d'Einstein.

DES LENTILLES POUR MIEUX VOIR

Quand la lumière d'un objet situé au-delà de l'amas de galaxies se propage dans l'Univers, elle suit l'espace-temps courbé autour de l'amas (voir l'encadré ci-dessous). Elle peut alors suivre différentes trajectoires, ce qui a plusieurs conséquences sur l'image que nous percevons de cet objet lointain: il apparaît gauchi et étiré, parfois en plusieurs images et, si les conditions sont optimales, les différents trajets de la lumière convergent au niveau de l'observateur sur Terre et l'intensité de l'image est amplifiée. Si cet effet vous semble abstrait, vous pouvez vous en faire une idée plus concrète avec un effet optique plus classique. Regardez une bougie allumée à travers la base d'un verre à pied, et vous verrez de multiples images, grossies, de la flamme.

Pour les astronomes du projet *Relics*, l'utilisation des lentilles gravitationnelles a deux intérêts principaux. D'abord, les galaxies grossies

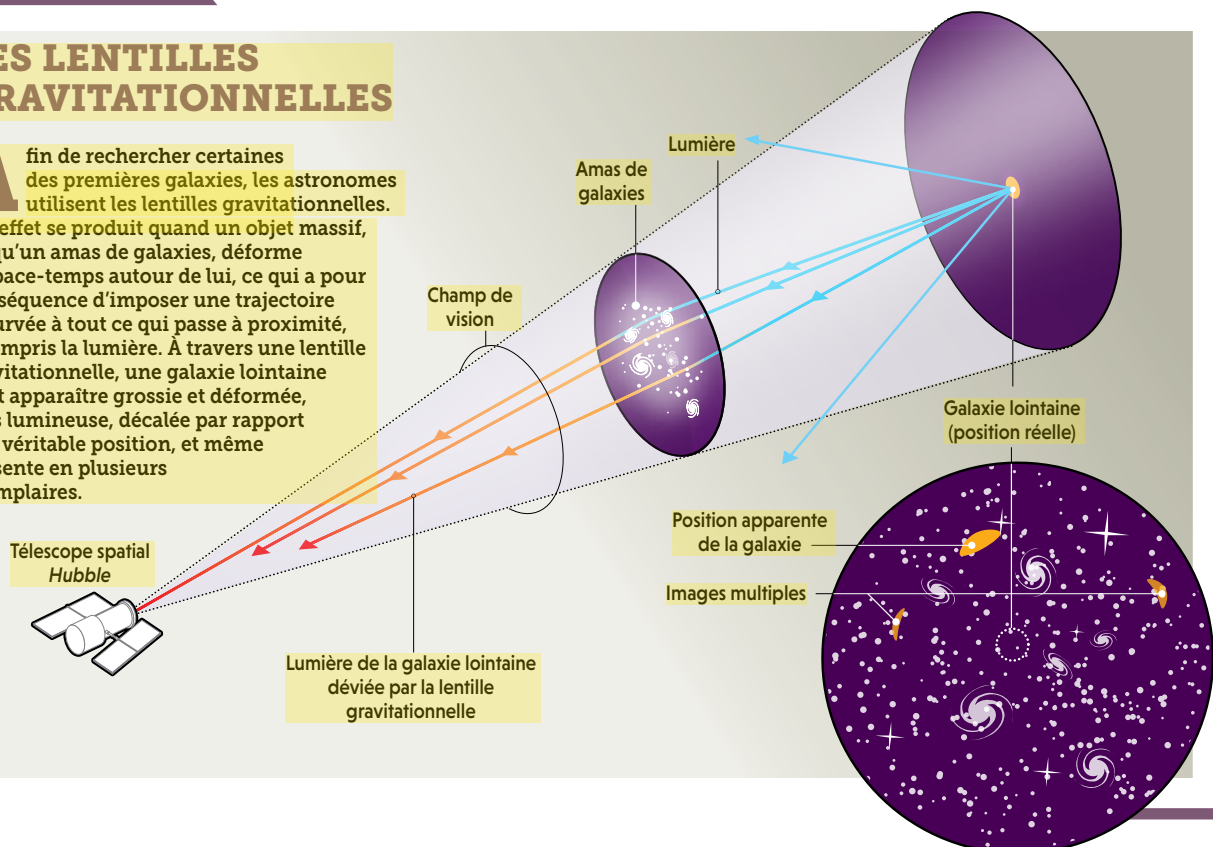
sont plus brillantes et résolues avec davantage de détails que d'ordinaire, ce qui nous permet de mieux étudier leurs propriétés. L'autre point est que les simulations de formation des galaxies (comme *Eagle*, *Illustris*, etc.) montrent que les premières galaxies sont très peu brillantes (en plus d'être lointaines), et donc bien au-delà des capacités de détection directe par les télescopes actuels. Il est donc très difficile de révéler ces galaxies par d'autres méthodes, par exemple en observant longtemps des zones «vides», comme dans le cadre des observations de champs profonds par *Hubble*.

Cependant, la technique des lentilles gravitationnelles a une contrepartie importante. Certes, le grossissement nous permet de voir des galaxies moins brillantes, mais, ce faisant, il zoome sur une région plus petite du ciel, qui contient moins de galaxies. La probabilité de voir une galaxie qui nous intéresse diminue, *a priori*. Par chance, l'Univers primordial foisonnait de petites galaxies peu lumineuses, ce qui compense l'effet de zoom: nous détectons beaucoup de galaxies lointaines malgré le champ d'observation restreint.

Trois des plus grands programmes du télescope *Hubble* mis en œuvre ces sept dernières années ont utilisé les lentilles gravitationnelles pour rechercher les galaxies lointaines. Leurs équipes ont, elles aussi, travaillé en tandem avec le télescope *Spitzer*. Ce dernier est ➤

LES LENTILLES GRAVITATIONNELLES

Afin de rechercher certaines des premières galaxies, les astronomes utilisent les lentilles gravitationnelles. Cet effet se produit quand un objet massif, tel qu'un amas de galaxies, déforme l'espace-temps autour de lui, ce qui a pour conséquence d'imposer une trajectoire incurvée à tout ce qui passe à proximité, y compris la lumière. À travers une lentille gravitationnelle, une galaxie lointaine peut apparaître grossie et déformée, plus lumineuse, décalée par rapport à sa véritable position, et même présente en plusieurs exemplaires.



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

3000 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.

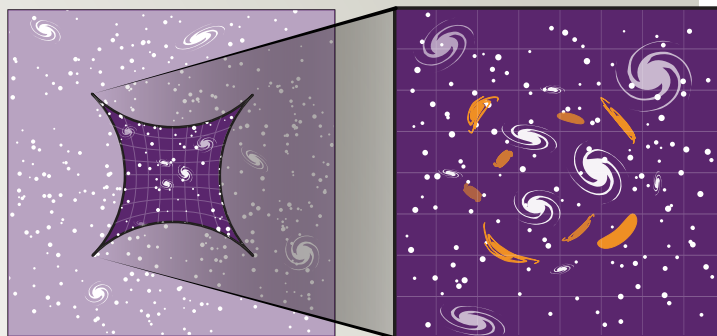
Le projet *Frontier Fields* a observé six régions relativement vides, s'inscrivant dans la continuité des précédents programmes de champs profonds. Mais il a aussi rompu avec cette approche en obtenant des images profondes de six régions contenant certaines des plus fortes concentrations de galaxies 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 âgé de moins d'un milliard d'années.

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