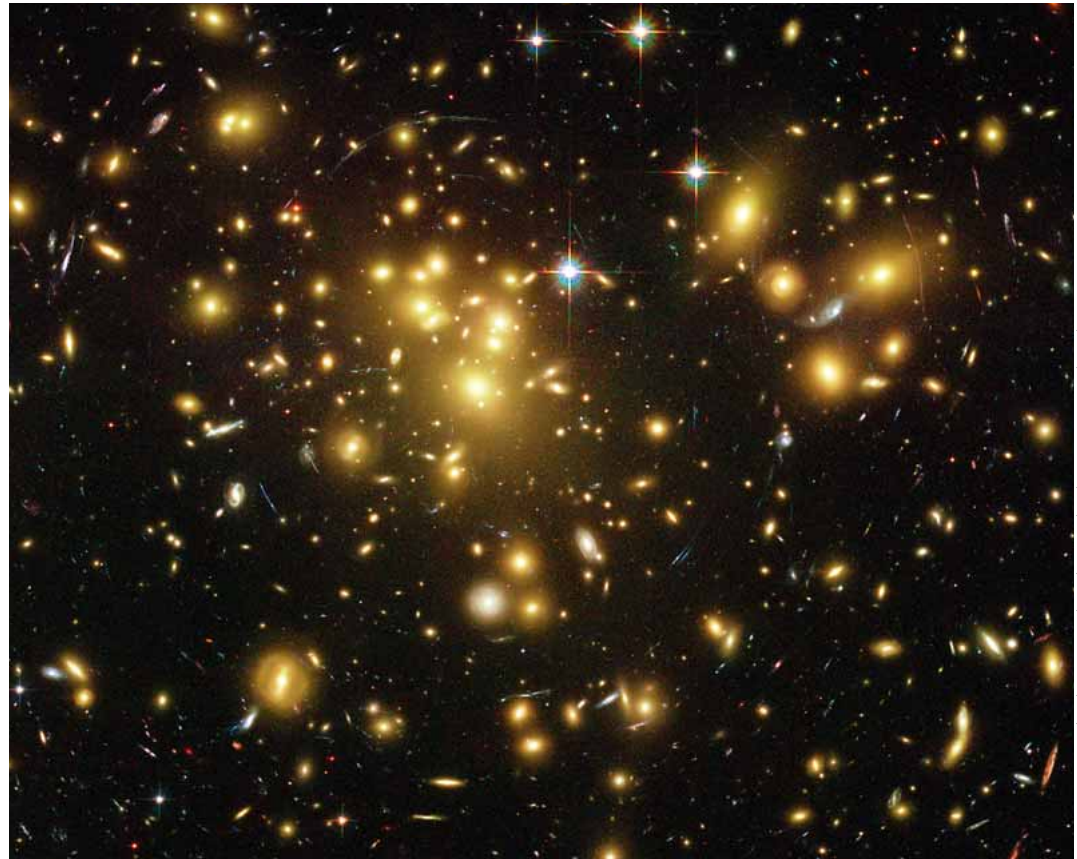


À la recherche des grands ancêtres

Quand les premières galaxies commencèrent-elles à briller dans l'histoire de l'Univers ? En quoi différaient-elles des galaxies actuelles ? La traque des objets les plus anciens de l'Univers cherche à répondre à ces questions.



L'amas de galaxies
Abell 1689 où une galaxie
très éloignée avec un
décalage spectral
d'environ 7,6
a probablement été
découverte.
L'étude des premières
galaxies est un sujet
de recherche active
extrêmement fascinant.

NASA, ESA, L. Bradley (JHU), R. Bouwens (UCSC), H. Ford (JHU), and G. Illingworth (UCSC)

Dans un passé très lointain, l'Univers était très dense et très chaud. Le **fond diffus cosmologique** nous révèle que, 380 000 ans après le **big bang**, il était encore constitué d'un **plasma** homogène (voir *La grande histoire thermique de l'Univers*, p. 62). De toute évidence, il n'existait aucune **étoile** ou **galaxie** en ce temps-là. Les écarts par rapport à cette homogénéité – mesurés par les satellites américains COBE (*COsmic Background Explorer*), puis WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) et, au cours des prochaines années, par le satellite Planck lancé en mai 2009 (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) – ne dépassaient guère une partie pour 100 000. Et pourtant, ces fluctuations minimes intéressent au plus haut point les **cosmologistes**. Elles constituent en effet les germes à partir desquels se sont constitués les étoiles, galaxies et **amas** qui, 13 milliards d'années plus tard, peuplent l'espace intergalactique. Pour comprendre la formation initiale des galaxies, il faut identifier les objets les plus anciens de l'Univers, ou tout au moins recueillir leur lumière fossile. Cette traque repose sur le fait que l'Univers est en expansion. Tous les objets s'éloignant les uns des autres, les **photons** émis par une source et reçus par un observateur subissent un **décalage spectral**, dit **redshift**, noté z (voir Mémo A, *Sonder l'Univers sur toute la gamme lumineuse*, p. 31). Leur **fréquence** – et donc leur énergie – diminue, un peu comme la sirène d'une ambulance s'éloignant de nous paraît devenir de plus en plus grave. Or tous les objets, même les plus anciens, sont (ou étaient) composés des mêmes **éléments**, dont les **longueurs d'onde** ou fréquences d'**émission** et d'**absorption** ont été mesurées avec précision au laboratoire. En comparant à ces références les longueurs d'onde ou fréquences présentes dans le **spectre** d'une source cosmologique, les physiciens peuvent donc estimer sa distance et le moment où sa lumière a été émise. Le rapport des longueurs d'onde observées aux longueurs d'onde intrinsèques est exactement celui de l'échelle globale de l'Univers actuel à l'échelle de l'Univers lorsque la lumière a été émise. Par convention, ce paramètre important est pris comme étant égal à « un plus le redshift », donc : $1 + z$. Un décalage spectral nul ($z = 0$) correspond au moment présent et caractérise la lumière provenant des objets proches, alors que les valeurs élevées de z se rapportent à l'Univers distant.

Reconnaître les objets très éloignés

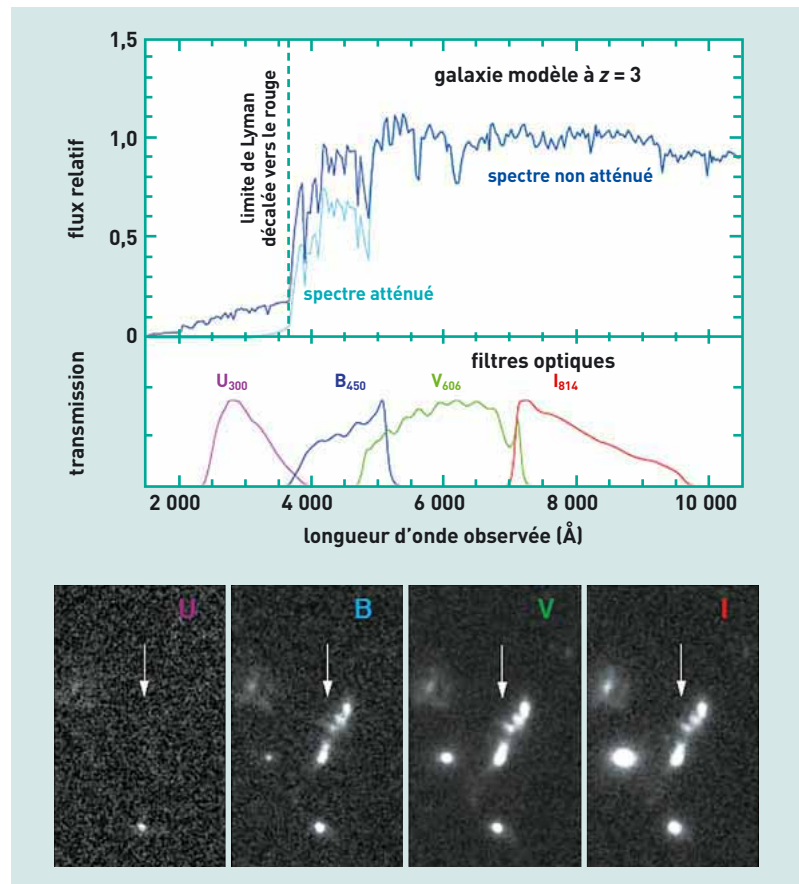
Le fond diffus cosmologique, émis par un Univers âgé de 380 000 ans, a une valeur de z légèrement supérieure à 1 000. Pour la plupart des galaxies et étoiles recensées, z varie de 0 à 3. Cette dernière valeur correspond à un Univers âgé d'environ 2,2 milliards d'années. Les cosmologistes considèrent que les **galaxies** « normales », comme les **spirales** comparables à notre **Voie lactée** ou les **galaxies elliptiques** très massives (par exemple M87 dans l'Amas de la Vierge), se sont formées après cette date. Les « premières galaxies » auraient, elles, un décalage spectral supérieur à 3. Malheureusement, il devient très difficile, avec les instruments existants, de localiser et étudier des galaxies au-delà de cette limite. Il faut braquer les plus grands télescopes sur une même région pendant de longues périodes⁽¹⁾. Cela donne des images certes très « profondes » mais comportant tellement de galaxies

qu'il est délicat de distinguer celles dont le rayonnement est faible car elles sont éloignées, de celles qui émettent peu parce qu'elles sont petites, tout simplement. Les galaxies les plus éloignées connues à ce jour avec certitude se situent à un redshift d'environ 7, correspondant à un Univers âgé de moins d'un milliard d'années.

Pour reconnaître les objets les plus distants, les astrophysiciens utilisent la technique de la discontinuité de Lyman (*Lyman Break Technique*), qui s'est largement répandue depuis le milieu des années 1990. Elle repose sur le fait que l'**hydrogène** intergalactique **absorbe** les photons de longueur d'onde inférieure à 912 Å, correspondant à l'**ultraviolet extrême**. Cette « limite de Lyman » représente l'énergie nécessaire pour arracher l'**électron** de l'**atome** d'hydrogène. Il en résulte que très peu, voire aucune lumière émise avec une longueur d'onde inférieure à 912 Å ne nous parvient des galaxies distantes. Cela donne lieu à une discontinuité (ou rupture) très caractéristique qui permet de reconnaître les galaxies lointaines par leurs couleurs anormales. Pour les astronomes, le terme couleur fait généralement référence au rapport des flux ou **luminosités** observés à partir de bandes passantes différentes (figure 1). Or le décalage spectral des sources très éloignées déplace cette limite vers des longueurs d'onde supérieures⁽²⁾. Par exemple, pour z égal à 3,

- (1) Le champ ultra-profond de Hubble (*Hubble Ultra Deep Field*), une petite région de ciel d'environ 3×3 arcmin², a ainsi été observée pendant environ 400 heures, au moyen du télescope spatial Hubble de la NASA/ESA, en utilisant quatre filtres de longueurs d'onde différentes, de 4 000 à 9 000 Å.
- (2) Ce qui permet de l'observer depuis la Terre, alors que l'atmosphère bloque les longueurs d'onde de l'ordre de 1 000 Å.

Figure 1. Illustration de la technique de discontinuité de Lyman, en utilisant les images obtenues avec quatre filtres optiques équipant le télescope spatial Hubble. La photo du bas montre une galaxie réelle à $z = 3$ sélectionnée par cette technique.

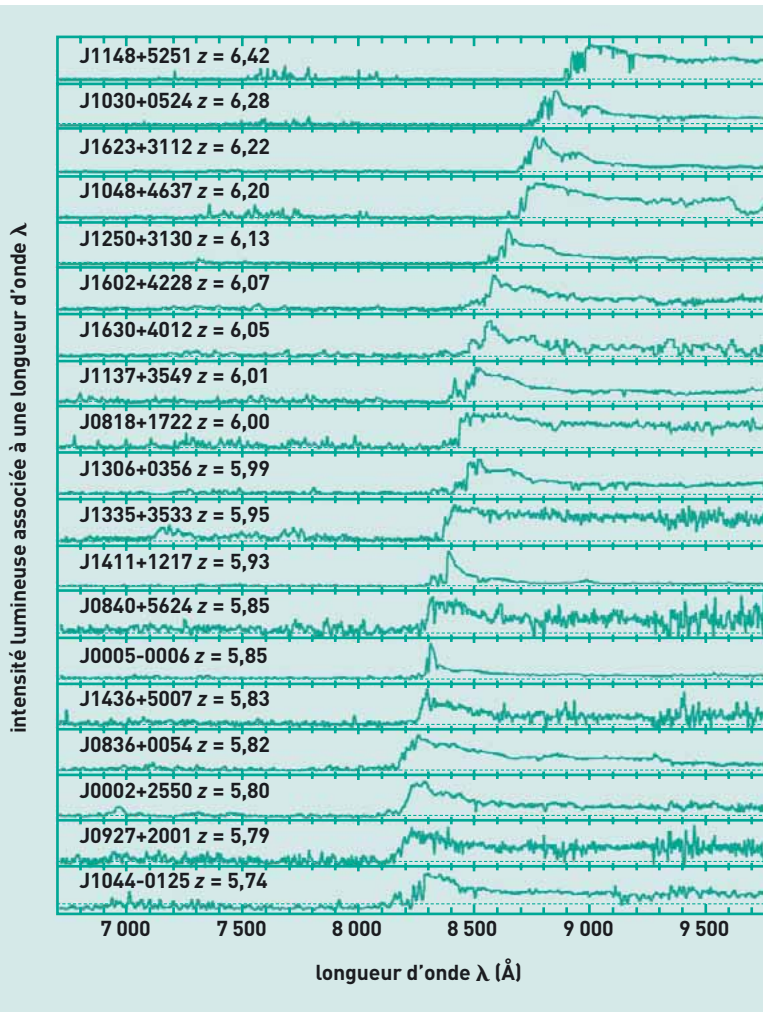


(M. Dickinson, Proceedings Symposium "The Hubble Deep Field", May 1997, STScI, eds. M. Livio, S. M. Fall and P. Madau)



NASA, ESA/JPL-Caltech/B. Mobasher (STScI/ESA)

Champ ultra-profond de Hubble dévoilant de nombreux objets parmi lesquels les scientifiques doivent distinguer les galaxies éloignées de celles qui sont petites.



[FAN XUEHU et al., The Astronomical Journal, 132, p. 117-136, 2006]

Figure 2. Spectres de **quasars** à décalage spectral très élevé, faisant partie des sources les plus lumineuses connues à redshift élevé. Ces objets ont été choisis parce que leur nature a été clairement confirmée par la discontinuité de Lyman et la spectroscopie correspondante. La discontinuité à de tels redshifts est proche de 1 216 Å, du fait du phénomène de la forêt Lyman-alpha.

la discontinuité est perçue à environ 3 600 Å, ce qui correspond aux **rayons ultraviolets**. Les galaxies très éloignées (z supérieur à 3) présentent une discontinuité dans le **visible**. Au fur et à mesure de l'augmentation du redshift, un phénomène qui tend à déplacer la discontinuité vers des longueurs d'onde plus élevées vient s'ajouter : il s'agit du rôle joué par la forêt de nuages Lyman-alpha⁽³⁾, qui absorbe les rayonnements émis entre 912 et 1 216 Å (figure 2). La galaxie la plus lointaine connue, dont le décalage spectral vaut 6,96, présente une discontinuité vers 10 000 Å, donc située dans le **proche infrarouge**⁽⁴⁾.

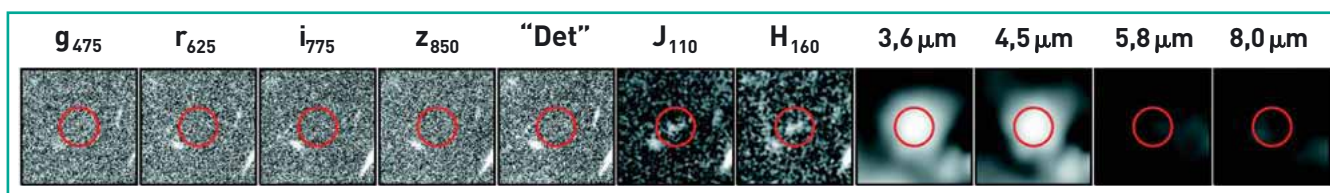
La course aux premières galaxies

À l'heure actuelle, les astronomes ont recensé plusieurs milliers de galaxies présentant un décalage spectral d'environ 3, plusieurs centaines d'autres avec une valeur de z proche de 6, mais seulement une poignée de galaxies dont le redshift dépasse 6,5. Encore ne s'agit-il que de « candidats galaxies » : plusieurs types d'objets pourraient présenter des couleurs similaires à celles produites par les discontinuités de Lyman à un décalage spectral élevé. Par exemple, les **naines de type M** ou les **naines brunes** montrent un type de discontinuité similaire à des longueurs d'onde du domaine visible et même **infrarouge proche**. En outre, des galaxies ayant un redshift inférieur, mais très vieilles ou extrêmement rougies par la poussière, peuvent être confondues, du fait de leurs couleurs, avec des galaxies à valeur de z très élevée.

Par conséquent, la discontinuité de Lyman ne permet pas à elle seule d'identifier à coup sûr les objets éloignés.

(3) Forêt de nuages Lyman-alpha : nuages de gaz qui absorbent une partie de la lumière émise par les galaxies et les quasars lointains, faisant apparaître dans leurs spectres de nombreuses raies d'absorption.

(4) D'autres techniques se sont révélées efficaces comme, par exemple, la recherche des émissions Lyman-alpha décalées vers le rouge à 1 216 Å, et dans certains cas, des galaxies très éloignées ont été découvertes par l'intermédiaire des **sursauts gamma** détectés dans leur forte émission d'énergie.



[L. BRADLEY et al., *The Astrophysical Journal*, 678, p. 647-654, 2008]

Figure 3. Probablement l'objet le plus éloigné connu, les scientifiques pensent que cette galaxie à discontinuité de Lyman se trouve à un redshift d'environ 7,6. Découverte dans le champ de l'amas de galaxies Abell 1689, sa luminosité est amplifiée par l'effet de lentille gravitationnelle dû à l'amas. Les images en couleurs multiples montrent que cette galaxie est uniquement détectée à des longueurs d'onde supérieures à 1,1 μm et est invisible à des longueurs d'onde inférieures. g, r, i et z sont quatre filtres dans le domaine du visible allant du bleu au rouge, proche de l'infrarouge. Quant aux filtres J et H, ils ne laissent passer que la lumière infrarouge. "Det" correspond à une image combinant plusieurs couleurs.

Il faut la compléter par des études spectroscopiques afin de déterminer leur distance sans ambiguïté. Relativement aisé pour des galaxies de décalage spectral proche de 3, le processus devient très long et souvent irréalisable au-delà de $z = 6$. Il devient également de plus en plus difficile d'étudier les propriétés de ces galaxies très éloignées. Certains scientifiques ont déclaré avoir découvert des galaxies jusqu'à $z = 7,5$, ce qui semble tout à fait plausible, même s'il n'est pas encore possible de le confirmer par la spectroscopie (figure 3). Des revendications encore plus audacieuses font état de galaxies présentant des décalages spectraux de 10 voire de 12, mais ces découvertes restent controversées.

Une ionisation mystérieuse

S'il est fascinant de rechercher les galaxies les plus éloignées, les astronomes ne sont pas mus par le seul désir de repousser les limites de l'Univers connu. Il s'agit aussi de répondre à certaines questions scientifiques fondamentales. Par exemple, l'observation du fond diffus cosmologique a révélé que l'hydrogène de l'Univers a été ré-ionisé à une époque correspondant à un décalage spectral d'environ 11. Autrement dit, l'hydrogène était essentiellement neutre de $z = 1000$ à $z = 11$, puis principalement ionisé de $z = 11$ à aujourd'hui ($z = 0$). Pour ioniser la plupart des atomes, il est nécessaire de leur apporter de l'énergie et d'arracher leurs électrons. Cette énergie est supposée être fournie par le rayonnement ultraviolet émis par les premiers objets formés. Des photons ayant des longueurs d'onde inférieures à 912 Å sont indispensables au processus. Reste à trouver les sources du rayonnement ultraviolet. De tels photons pourraient provenir d'étoiles en formation ou de l'accrétion de matière sur les premiers trous noirs supermassifs. Pour corroborer ces idées, il faudrait démontrer qu'il y a suffisamment de sources à un décalage spectral très élevé pour ré-ioniser l'Univers. Or les astronomes sont encore bien loin de cet objectif. Même à des redshifts plus faibles, aux environs de 6, il n'a pas été détecté suffisamment de galaxies. Des recherches intensives s'efforcent aujourd'hui de résoudre cette énigme. Les théories les plus courantes suggèrent qu'il existe d'innombrables petites galaxies, non encore découvertes, produisant la quantité de rayonnement ultraviolet requis.

Étoiles et poussière

La recherche en matière de galaxies distantes tente actuellement d'éclaircir un autre mystère, tout aussi fascinant : celui des étoiles de *population III*. Historiquement, les astronomes ont regroupé les étoiles riches en métal des bras spiraux de la Voie lactée

dans la *population I*, et les étoiles plus anciennes et plus pauvres en métal, situées dans le bulbe galactique, dans la *population II* (voir *La vie des galaxies actives*, p. 44). Cependant, selon certaines théories, lorsque de la matière gazeuse fut convertie en étoiles pour la première fois, des types très différents d'étoiles ont été créés. En l'absence de métaux (éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium), il ne pouvait se former que des étoiles très massives : plusieurs centaines de fois la masse du Soleil. Le spectre de tels objets comporterait nécessairement des raies d'émission très intenses de l'hélium. Or, malgré des efforts continus, rien de semblable n'a été observé à ce jour. La fabrication et la dissémination d'éléments lourds ont donc probablement eu lieu très tôt dans l'histoire de l'Univers. La découverte d'étoiles de *population III* demeure cependant un objectif important. Elle permettrait de comprendre et d'étudier l'Univers à un moment où la majeure partie du gaz était à son état originel, juste après la formation des premiers éléments chimiques (hydrogène et hélium) par le big bang. Les astrophysiciens attendent beaucoup du lancement du télescope spatial James Webb, au cours de la prochaine décennie (voir *JWST : regard sur un passé de treize milliards d'années*, p. 102). Ils espèrent trouver alors quelles sortes d'objets ont ré-ionisé l'Univers, et démontrer l'existence des étoiles de *population III*.

Enfin, la plupart des techniques de détection utilisées à ce jour, basées sur le rayonnement ultraviolet, ne peuvent s'appliquer qu'à des objets dont l'émission ne traverse pas de la poussière cosmique, laquelle absorbe ce type de photons. Très récemment, des astrophysiciens du CEA ont identifié des galaxies géantes produisant des étoiles à des valeurs de z très élevées, parfois supérieures à 4, grâce à la détection du continuum émis par la poussière. Beaucoup d'objets de ce type pourraient exister, même s'ils présentent des taux de formation d'étoiles plus faibles que les galaxies extrêmes découvertes à ce jour. Le télescope spatial Herschel, lancé en mai 2009, (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) et ultérieurement la mise en service du radiotélescope géant ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*) au Chili ouvriront de nouvelles perspectives de recherche pour identifier et étudier des premières galaxies obscurcies par la poussière.

> Emanuele Daddi

Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)