

partie du rayonnement ultraviolet de cet objet céleste. Ce quasar, ULAS J1120+0641, qui émit sa lumière environ 770 millions d'années après le Big Bang, a enfin permis aux astrophysiciens d'aborder l'ère de la réionisation cosmique, mais, même si près du Big Bang, l'essentiel de l'hydrogène neutre avait déjà été détruit.

Toutefois, il est possible que ce quasar se trouve dans une région pauvre en vestiges d'hydrogène neutre, et que la plupart des autres quasars situés à une telle distance

aient été complètement masqués. Il est tout aussi possible qu'ULAS J1120+0641 se trouve dans une région particulièrement dense et que la réionisation ait été déjà complète ailleurs. En l'absence d'autres exemples, les astronomes ne peuvent pas se prononcer, et les chances de trouver suffisamment de quasars à cette distance pour faire une étude statistique fiable sont maigres.

ULAS J1120+0641 a néanmoins beaucoup de choses à apprendre aux astronomes. Pour commencer, R. Ellis souligne

que le nombre de quasars décroît si vite avec la distance qu'il est inconcevable que les trous noirs massifs soient une source de rayonnement suffisante pour avoir réionisé l'Univers. Par ailleurs, le trou noir qui alimente ce quasar doit avoir une masse équivalente à un milliard de soleils pour libérer la quantité d'énergie qui lui permet d'être visible à une telle distance. «Il est presque impossible de comprendre comment il a pu se former en si peu de temps», ajoute R. Ellis.

## Les métaux : des premières étoiles à l'Univers actuel

**L**a théorie du Big Bang décrit la naissance de l'Univers et précise que l'hydrogène et l'hélium ont été produits dans les premières minutes avec seulement des traces d'éléments plus lourds que les astrophysiciens nomment des métaux.

Dans le scénario de formation des premières étoiles, décrit par Michael Lemonick, ces astres sont dépourvus de métaux, contrairement aux étoiles actuelles. L'absence de métaux dans les nuages de gaz qui se sont effondrés pour former les premières étoiles explique pourquoi ces astres étaient si chauds et massifs. Voyons quel a été le rôle précis de l'absence de métaux dans la naissance de ces étoiles et leur évolution, ainsi que les conséquences pour les observations.

La nucléosynthèse primordiale décrit les réactions nucléaires à l'œuvre dans les premières minutes de l'Univers. Cette théorie prévoit que l'hydrogène et l'hélium sont produits majoritairement, avec des traces infimes de métaux. Ce scénario a été confirmé par des mesures difficiles sur des nuages de gaz qui ont peu évolué depuis le Big Bang.

Les calculs théoriques indiquent que la structure, la taille et les propriétés d'une étoile sont comparables à celles des étoiles actuelles lorsque la métallicité – le rapport des densités des métaux et de l'hydrogène – est de l'ordre de  $10^{-10}$  ou  $10^{-9}$ . Une étoile est

donc considérée comme dépourvue de métaux si sa métallicité est inférieure. Aujourd'hui, les mesures sur les étoiles les plus pauvres en métaux dans le halo de la Voie lactée donnent une métallicité de l'ordre de  $10^{-7}$  soit au moins deux ordres de grandeur au-dessus de ce qu'on envisage pour les premières étoiles. Cela résume toute la difficulté d'une telle mesure.

Les premières étoiles étaient composées principalement d'hydrogène et d'hélium (une composition «primordiale» sans métaux). Cela a influencé leur évolution et leur structure de deux façons. D'abord, le nuage de gaz s'est effondré sous l'effet de la gravité et s'est échauffé. Un tel nuage peut se refroidir et se fragmenter selon divers processus. Mais les nuages primordiaux n'ont pu évacuer la chaleur que par des émissions d'hydrogène moléculaire, un processus peu efficace. Ces nuages étaient donc plus chauds que les nuages observés aujourd'hui. Et ils ne se sont peut-être pas fragmentés autant pour former de petits grumeaux qui ont donné naissance à de petites étoiles.

Par ailleurs, lorsque le nuage de gaz s'effondre, la densité augmente jusqu'à ce que des réactions de fusion nucléaire s'amorcent dans son cœur. Les premières étoiles ont puisé leur énergie surtout d'un processus nucléaire peu efficace, la chaîne p-p (qui correspond à la fusion de quatre noyaux d'hydrogène pour former de l'hélium). Dans les étoiles actuelles, d'autres réactions nucléaires plus efficaces sont possibles, mais elles nécessitent la présence de métaux, même en petites quantités. Par conséquent, une étoile primordiale s'effondre plus sur elle-même qu'une étoile actuelle, jusqu'à ce que l'énergie produite par le cœur suffise pour contrebalancer la gravité. Les premières étoiles devaient donc être plus chaudes, plus brillantes et plus denses que les étoiles actuelles et avoir un spectre lumineux spécifique. Leur masse était de l'ordre de quelques masses solaires à plusieurs centaines (la masse moyenne des étoiles dans les galaxies actuelles est environ une demie masse solaire). Cela expliquerait aussi pourquoi les premières étoiles n'ont pas été détectées. En effet, plus une étoile est massive, plus sa durée de vie est courte. Les premières étoiles avaient une durée de vie comprise entre un et quelques millions d'années. Les premières étoiles auraient donc

disparu assez vite à une époque trop reculée pour nos télescopes (environ 500 millions d'années après le Big Bang).

Les premières étoiles ont émis un fort rayonnement ultraviolet ionisant, comparable à de petits quasars. Ce rayonnement a progressivement ionisé le gaz du milieu intergalactique, créant des sphères croissantes d'hydrogène ionisé. Le processus était terminé pour l'hydrogène à un décalage vers le rouge de 6,5.

Les premières étoiles ont participé à la réionisation de l'hydrogène, mais elles ont aussi produit des quantités importantes de métaux dans l'Univers, permettant l'apparition des nouvelles générations d'étoiles. Les premières étoiles ont produit tous les éléments jusqu'au fer, et les éléments plus lourds lors de leur mort sous la forme de supernova. Ces métaux se sont alors dispersés dans les galaxies et le milieu intergalactique, ouvrant la voie aux étoiles modernes. L'enrichissement en métal de l'Univers par les premières étoiles implique aussi que ces dernières ne devaient pas être trop massives, sinon elles auraient toutes fini en trous noirs, ce qui aurait empêché la transition vers un Univers peuplé d'étoiles de petite masse.

– **Aparna Venkatesan**  
Maître de conférences  
de l'Université de San Francisco

Et pourtant il s'est formé. Abraham Loeb, directeur du Département d'astronomie de Harvard, fait remarquer que si une étoile de 100 masses solaires s'est effondrée en trou noir quelques centaines de millions d'années après le Big Bang, il est concevable que ce trou noir ait crû jusqu'à former un quasar, si les conditions étaient favorables. Mais pour ce faire, il faudrait qu'il ait été alimenté en continu, ce qui semble difficile. Un quasar brille tellement et produit tant d'énergie qu'il expulse le gaz de son voisinage. Sans une réserve de gaz à proximité, le quasar devient momentanément sombre, ce qui permet au gaz de s'accumuler à nouveau, jusqu'à ce qu'il puisse se « rallumer », et expulser de nouveau son combustible. « Ainsi, il y a toujours une notion de cycle d'activité », souligne A. Loeb. « Le trou noir ne peut croître que pendant des durées limitées. » Mais des trous noirs peuvent aussi fusionner, ce qui accélérerait leur croissance.

Au moment même où la traque des quasars lointains s'essouffait, la recherche de galaxies toujours plus proches du Big

Bang accélérât. Le plus important des déclencheurs a été une image, le « champ profond de *Hubble* ». Il a été photographié en 1995, quand Robert Williams, alors directeur de l'Institut scientifique du télescope spatial, a utilisé une prérogative de son poste, le « temps discrétionnaire du directeur », pour pointer *Hubble* sur une zone apparemment vide du ciel pendant une trentaine d'heures cumulées, afin de voir les objets pâles qui pouvaient s'y trouver. Des astronomes très sérieux ont essayé de le convaincre que c'était une perte de temps, se rappelle l'actuel directeur Matt Mountain, « qu'il ne verrait rien ».

## Il y a bien longtemps, dans une galaxie lointaine

En fait, le télescope a détecté plusieurs milliers de petites galaxies peu brillantes, dont beaucoup étaient parmi les plus lointaines jamais observées. Les images suivantes du champ profond (réalisées à l'aide d'un nouvel instrument, le *Wide Field Camera 3*, installé lors d'une mission de maintenance

en 2009 et 35 fois plus efficace que son prédécesseur) en ont trouvé encore davantage. « Nous sommes passés de quatre ou cinq galaxies ayant un décalage vers le rouge de 7 ou plus à plus d'une centaine », explique Daniel Stark de l'Université d'Arizona et collègue de longue date de R. Ellis. L'une d'entre elles, décrite par R. Ellis, D. Stark et leurs collègues en 2012, semble atteindre un décalage vers le rouge de 11,9, soit moins de 400 millions d'années après le Big Bang.

Comme le quasar détenteur du record d'ancienneté, ces jeunes galaxies peuvent en apprendre beaucoup aux astronomes sur la répartition de l'hydrogène intergalactique à l'époque. Quand les observateurs regardent le flux de lumière ultraviolette émis par ces galaxies, il manque une fraction notable de ce qu'ils attendaient, signe d'une absorption par l'hydrogène neutre qui les entoure. Cette fraction absorbée diminue progressivement quand on regarde des galaxies de plus en plus proches de la Terre, jusqu'à ce que, environ un milliard d'années après la naissance de l'Univers, le cosmos devienne complètement transparent.

### LA QUÊTE DES QUASARS

Les quasars sont parmi les objets les plus brillants de l'Univers primordial, visibles à plus de dix milliards d'années-lumière de distance. Quand la lumière issue d'un quasar traverse l'Univers en direction de nos télescopes, on constate deux phénomènes. D'une part, la longueur d'onde de lumière est étirée par l'expansion de l'Univers : le spectre se décale progressivement vers le rouge au cours de la propagation de la lumière. D'autre part, l'hydrogène atomique absorbe à une longueur d'onde lumineuse particulière. Les astronomes peuvent mesurer l'absorption de la lumière en fonction de la longueur d'onde pour voir comment la densité de l'hydrogène neutre s'est modifiée au fil du temps. Ils ont ainsi trouvé que les bulles isolées de gaz ionisé sont devenues plus grosses et plus fréquentes à mesure que l'Univers évoluait.

