

quand les galaxies étaient, en moyenne, plus riches en gaz qu'elles ne le sont aujourd'hui. Pour les temps les plus reculés, le nombre de quasars diminue rapidement.

Ce n'est qu'en l'an 2000, quand le programme SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) a commencé à fouiller méthodiquement une grande portion du ciel avec les plus grands détecteurs disponibles alors, que le record a été battu. « Le programme SDSS a été extraordinairement fructueux pour trouver des quasars lointains », explique Richard Ellis, astronome à l'Institut de technologie de Californie. « On a trouvé une quarantaine ou une cinquantaine de

quasars ayant des décalages vers le rouge supérieurs à 5,5. »

Mais le programme n'a pas pu aller beaucoup plus loin qu'une poignée de quasars présentant des décalages vers le rouge compris entre 6 et 6,4, et même à cette distance, il n'y avait pas trace d'hydrogène neutre.

La découverte en 2012 d'un quasar à décalage vers le rouge de 7,085, par le relevé *Infrared Deep Sky Survey* au télescope infrarouge UKIRT à Hawaï, a enfin apporté les observations prévues. Les astronomes ont montré qu'une petite quantité d'hydrogène neutre a absorbé une

■ L'AUTEUR



Michael LEMONICK est journaliste scientifique pour le site *Climate Central*.

LES ÉTOILES GÉANTES DE L'UNIVERS JEUNE

Pourquoi les premières étoiles étaient-elles si grosses ? Toutes les étoiles se livrent à un exercice d'équilibre cosmique : la gravité tend à les rendre aussi compactes que possible, mais la pression de radiation au sein de l'étoile s'oppose à la gravité et maintient l'étoile volumineuse. En comparant la formation stellaire dans l'Univers moderne avec la formation stellaire dans l'Univers primordial, on commence à comprendre pourquoi les premières étoiles étaient si massives.

La formation stellaire aujourd'hui

Les galaxies modernes sont jonchées d'ingrédients tels que le carbone, l'oxygène et la poussière qui évacuent bien la chaleur. La pression de radiation est faible. Cela implique qu'un nuage de poussière qui s'effondre peut se contracter jusqu'à ce que son cœur soit si dense que l'hydrogène y subisse une fusion thermonucléaire. Une fois la fusion amorcée, l'énergie souffle les couches externes du nuage en effondrement, laissant derrière une étoile relativement petite.

Le matériau s'accumule

Le gaz se contracte

La fusion s'amorce

Les couches externes sont soufflées

Le matériau s'accumule

Le gaz se contracte

Le matériau continue à s'accumuler

La fusion s'amorce

La formation stellaire des débuts

L'Univers primordial ne contenait ni carbone, ni oxygène, ni poussière, seulement de l'hydrogène, de l'hélium et quelques traces de lithium. L'hydrogène ne se refroidit pas très efficacement. Quand les nuages de gaz ont commencé à s'effondrer, la densité des premières protoétoiles est restée faible à cause de la pression de radiation de l'hydrogène chaud. Les nuages de gaz ont continué à accumuler toujours davantage de gaz – pouvant dépasser la centaine de masses solaires. C'est seulement à ce stade qu'ils ont atteint une chaleur et une densité suffisantes pour que s'enclenche la fusion.

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

La 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*