

était apparue. Lors de la recombinaison, les atomes d'hydrogène et d'hélium – produits dans les premières minutes de l'Univers – qui emplissaient le cosmos étaient uniformément répartis dans l'espace. En revanche, la matière noire, dont les physiciens pensent qu'elle est constituée de particules invisibles et non identifiées à ce jour, avait déjà commencé à s'agréger dans des nuages qu'on désigne sous le nom de halos, et qui font en moyenne entre 10^5 et 10^6 masses solaires. La gravité régnant dans ces halos a attiré l'hydrogène et l'hélium. Le gaz, devenant de plus en plus dense et chaud, s'est embrasé et a commencé à émettre de la lumière : c'étaient les premières étoiles de l'Univers.

En principe, les étoiles géantes de la première génération, connues des astronomes sous le nom d'étoiles de Population stellaire III, auraient pu fragmenter le voile d'hydrogène gazeux et réioniser l'Univers. Mais ce scénario dépend beaucoup des caractéristiques de ces étoiles qui ont aujourd'hui disparu et n'ont jamais été observées. Si elles n'étaient pas assez brillantes ou avaient une durée de vie trop courte, elles n'auraient pas permis la réionisation.

Les astronomes ont pensé qu'elles devaient toutes être gigantesques, pesant chacune environ 100 fois la masse du Soleil (voir l'encadré page ci-contre). En effet, quand un grumeau de gaz s'effondre sous l'effet de la gravité, il s'échauffe, créant ce que l'on nomme une pression de radiation, qui s'oppose à la gravité ; si l'étoile ne peut pas évacuer cette chaleur, la pression de radiation empêche l'effondrement de la matière, et un cœur d'étoile se forme où s'amorce la fusion nucléaire.

Des étoiles de composition primordiale

Or les premières étoiles étaient constituées essentiellement d'hydrogène et d'hélium, qui sont relativement inefficaces pour évacuer la chaleur. Les étoiles similaires au Soleil renferment des traces d'autres éléments tels que l'oxygène et le carbone, qui permettent au nuage parent de se refroidir et de se contracter (voir l'encadré page ci-contre). Par conséquent, une protoétoile des débuts de l'Univers aurait accumulé beaucoup de gaz, devenant plus massive qu'une étoile

actuelle, avant de former un cœur dense où les réactions de fusion se seraient déclenchées. Or ces réactions repoussent une partie du gaz environnant vers l'espace.

Mais une étoile pourrait se former d'une autre façon. Thomas Greif, de l'Université Harvard, a développé des simulations complexes de formation stellaire. Celles-ci n'incluent pas seulement la gravité, mais aussi des rétroactions de l'hydrogène soumis à une pression croissante à mesure que le gaz s'effondre. En prenant en compte ces effets, Th. Greif a montré que le nuage peut se fragmenter pour donner un ensemble d'étoiles de quelques dizaines de masses solaires. Selon que la fragmentation est importante ou limitée, les étoiles sont plus ou moins grosses, élargissant la gamme de masses possibles.



Ces différences de taille impliquent une variabilité énorme de la durée de vie possible des premières étoiles, et donc du moment où la réionisation a pu avoir lieu. Les étoiles géantes de 100 masses solaires ou plus consomment vite leur combustible nucléaire et meurent jeunes. Des étoiles plus petites utilisent leurs réserves lentement. Dans ce cas, le processus de réionisation aurait été lent, s'étendant sur plusieurs centaines de millions d'années.

Quelle que soit leur taille, toutes ces étoiles auraient achevé leur existence en explosant sous forme de supernovae avant de s'effondrer en trous noirs. Et ces trous noirs (peut-être plus encore que les étoiles dont ils sont issus) auraient pu alimenter le moteur de la réionisation.

Les trous noirs avalent avec voracité le gaz environnant. Lors de sa chute, le gaz est comprimé et chauffé à des températures de plusieurs millions de degrés. Il est si chaud que, tandis que la majeure partie du gaz finit par disparaître dans le trou noir, une partie est rejetée dans l'espace sous forme de jets, qui brillent tant que leur lumière est visible aux confins du cosmos. On nomme ces objets des quasars.

Des années 1960 aux années 1990, les quasars ont été les seuls moyens de sonder l'Univers primordial. Au début, les astronomes n'avaient aucune idée de leur nature. Les quasars ressemblent à des étoiles proches de la Terre, mais leur spectre présente un énorme décalage vers le rouge (cet effet est dû à l'expansion de l'Univers qui étire les longueurs d'onde de la lumière). Ces décalages vers le rouge indiquent que les quasars sont très lointains. Mais cela implique aussi qu'ils doivent briller bien plus qu'une simple étoile pour être visibles à cette distance. Le premier à être découvert, 3C 273, a un décalage vers le rouge de 0,16. En prenant en compte un modèle d'expansion de l'Univers, il est possible de faire correspondre le décalage vers le rouge à la distance parcourue par la lumière et donc à l'époque de son émission. Ainsi, ce quasar a commencé à émettre de la lumière il y a environ 2,4 milliards d'années.

Puis des quasars présentant un décalage vers le rouge égal à 2 ont été repérés, ce qui les situe à plus de dix milliards d'années. En 1991, Maarten Schmidt, James Gunn et Donald Schneider, à l'Observatoire Palomar en Californie, ont trouvé un quasar ayant un décalage vers le rouge de 4,9, qui date donc d'il y a 12,5 milliards d'années, soit juste un peu plus d'un milliard d'années après le Big Bang. Les analyses du spectre (voir l'encadré page 43) de ce quasar montrent que l'Univers était déjà réionisé quand la lumière de ce quasar a commencé son périple vers la Terre.

Pendant l'essentiel des années 1990, personne n'a réussi à trouver un quasar plus éloigné. Cet échec n'était pas imputable aux instruments : le télescope spatial Hubble et les télescopes Keck à Hawaï ont été inaugurés au début des années 1990, ce qui a considérablement augmenté la capacité des astronomes à observer l'Univers profond. La raison tient au fait que les quasars sont des objets rares. Ils ne jaillissent que des trous noirs les plus massifs parmi les supermassifs. Et pour que nous puissions les voir, il faut que leurs jets de gaz soient dirigés précisément vers nous.

De plus, ces jets naissent quand un trou noir avale activement du gaz. Ce phénomène a connu son maximum d'activité à un décalage vers le rouge compris entre 2 et 3,

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

■ L'AUTEUR



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

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

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.