

L'ESSENTIEL

- L'Univers a connu une période d'obscurité avant l'apparition des premières étoiles, très différentes des astres actuels.
- Les premières sources de lumière ont réionisé l'Univers, arrachant des électrons aux atomes neutres d'hydrogène.
- Différents objets ont pu réioniser l'Univers : les premières étoiles, les galaxies ou des trous noirs supermassifs.
- Les astronomes étudient cette époque reculée en observant les galaxies, les quasars, les sursauts gamma...

L'Univers est né il y a environ 13,8 milliards d'années. Il a rapidement pris la forme d'un plasma brûlant, dense et bouillonnant de noyaux atomiques et d'électrons. S'il y avait eu quelqu'un pour l'observer, il aurait vu une purée de pois d'une clarté aveuglante.

Après 380 000 ans, l'Univers en expansion était suffisamment refroidi pour que les noyaux et les électrons s'associent en atomes neutres : c'est la recombinaison. Le brouillard s'est dissipé, les photons ont pu voyager à travers l'espace pour parvenir jusqu'à nous aujourd'hui sous la forme du rayonnement du fond diffus cosmologique. Mais après cette émission de lumière intense, l'Univers a été plongé progressivement dans l'obscurité, en l'absence de sources de lumière. Le cosmos est entré dans ce que l'on nomme l'âge sombre.

Et même quand les premières étoiles ont commencé à s'allumer, elles brillaient surtout dans la portion ultraviolette du spectre. Or l'hydrogène gazeux, quand il se forme, a tendance à absorber ce type de rayonnement, l'empêchant de se propager. L'Univers a échangé son brouillard primordial brûlant contre une brume froide et sombre.

Il fallut attendre plusieurs centaines de millions d'années pour que ce brouillard se lève à son tour. Pendant longtemps, le mécanisme en jeu est resté mystérieux. La fin de l'âge sombre était-elle le fait des premières étoiles, dont la lumière intense aurait progressivement arraché les électrons de l'hydrogène dans un processus dit de réionisation ? Ou l'énergie nécessaire pour la réionisation avait-elle été apportée par le rayonnement que libérait le gaz chaud englouti par les trous noirs ?

Quand les premières étoiles se sont allumées

Pour comprendre comment l'Univers est sorti des âges sombres, les astronomes sont partis à la recherche des objets cosmiques les plus vieux afin d'étudier leur nature et leur origine. Quand les premières étoiles se sont-elles allumées, et à quoi ressemblaient-elles ? Comment les étoiles se sont-elles assemblées pour former des galaxies, et comment ces galaxies ont-elles donné naissance aux trous noirs supermassifs qui se nichent presque toujours en leur cœur ? À quel stade de cette progression des étoiles aux galaxies et aux trous noirs la réionisation a-t-elle eu lieu ?

Les travaux sur ces questions ont débuté dans les années 1960, mais seuls les modèles numériques et les télescopes les plus récents sont assez puissants pour offrir quelques réponses : les premiers en simulant l'émergence et l'évolution des premières étoiles de l'Univers, les seconds en recueillant des lueurs émises par l'Univers à une époque où les premières galaxies étaient encore très jeunes.

Il y a dix ans environ, les astronomes pensaient comprendre comment la première génération d'étoiles

Adolf Schaller/MASA

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,