

La fin de l'âge sombre

Michael Lemonick

Après l'émission du rayonnement du fond diffus cosmologique, l'Univers a progressivement été plongé dans l'obscurité jusqu'à l'apparition des premières étoiles. À quoi ressemblaient ces astres et quand sont-ils apparus ?

LES PREMIÈRES ÉTOILES de l'Univers étaient gigantesques, parfois plus de 100 fois plus massives que le Soleil. Elles auraient contribué à dissiper le brouillard qui enveloppait l'Univers primordial avant de mourir dans des explosions de supernovae, telles celles figurées sur cette vue d'artiste.

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 Schellert/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, connus 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

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 chauffé. 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

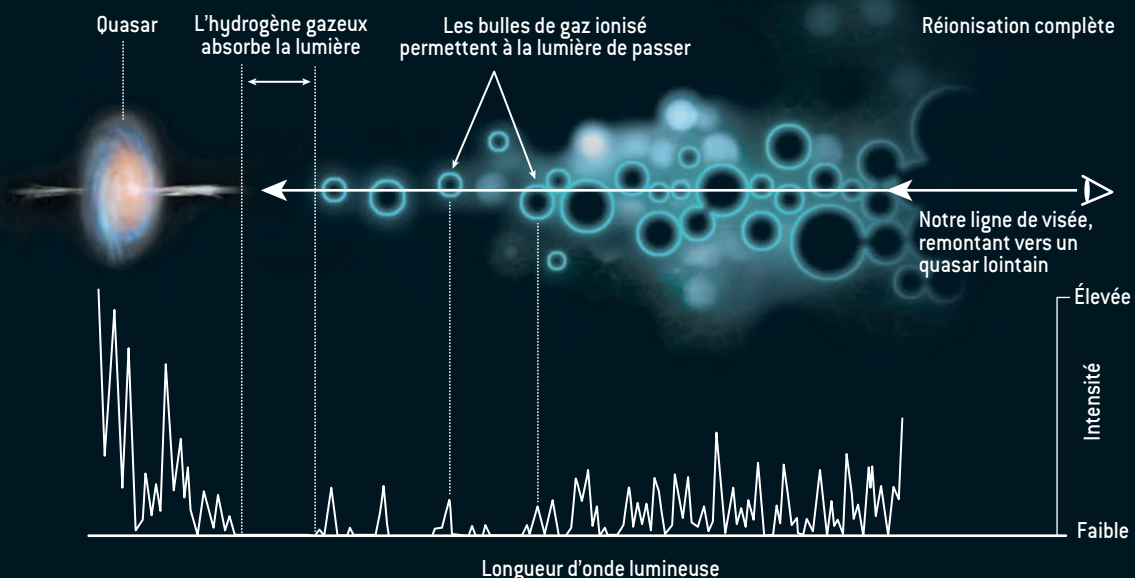
En fait, le télescope a détecté plusieurs milliers de petites galaxies peu brillantes, dont beaucoup étaient parmi les plus lointaines jamais observées. Les images suivantes du champ profond (réalisées à l'aide d'un nouvel instrument, le *Wide Field Camera 3*, installé lors d'une mission de maintenance

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.



En résumé, non seulement il existait des galaxies susceptibles d'être la source du rayonnement ionisant, mais ces galaxies révèlent aussi quand l'Univers a effectué sa transition de l'état neutre à l'état entièrement ionisé. Cependant, si vous prenez la centaine de galaxies découvertes jusqu'à présent ayant un décalage vers le rouge supérieur à 7 et que vous extrapolez au ciel entier, vous n'aurez pas assez de rayonnement ultraviolet pour ioniser tout l'hydrogène neutre. L'énergie nécessaire ne peut pas venir des trous noirs non plus, étant donné la difficulté de produire des trous noirs supermassifs en un temps limité.

Néanmoins, la réponse pourrait être assez simple. Certes, elles nous apparaissent très pâles, mais les galaxies que nous avons réussi à apercevoir à la limite de détection de *Hubble* sont les plus brillantes de leur époque. Il doit y avoir à cette distance beaucoup d'autres galaxies qui sont trop peu brillantes pour être vues avec le meilleur des télescopes existants. Selon R. Ellis, la

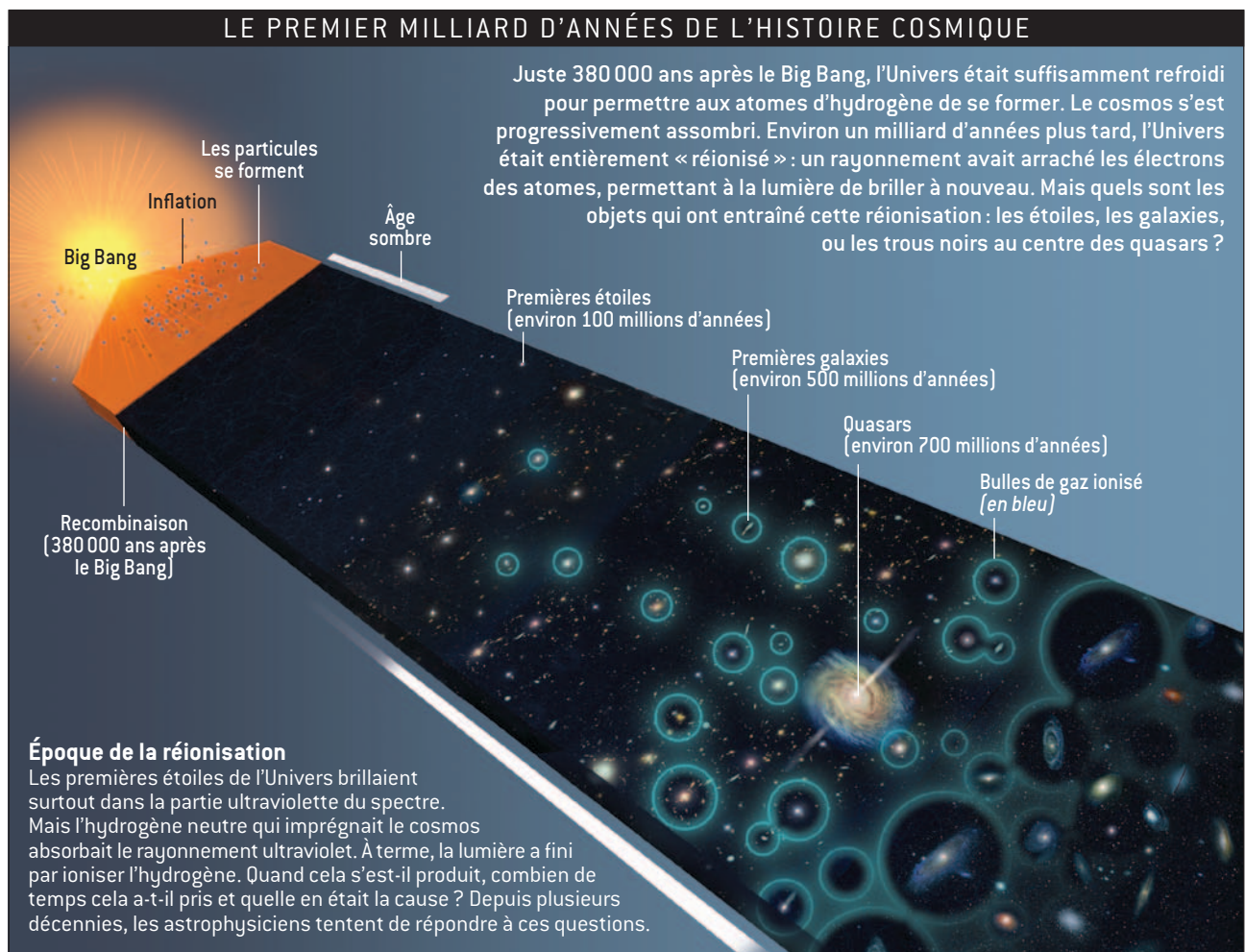
plupart des astronomes pensent maintenant que ce sont les galaxies qui ont fait l'essentiel du travail de réionisation de l'Univers.

Quant à l'aspect des galaxies juvéniles et au moment où elles se sont allumées, « nous n'en sommes pas encore là », admet D. Stark. « Les galaxies que nous voyons sont assez petites, et elles ont l'air beaucoup plus jeunes que les galaxies qui ont été étudiées en détail un à deux milliards d'années plus tard. » Mais elles avaient déjà jusqu'à 100 millions d'étoiles, et leur mélange de couleurs (après correction pour tenir compte du décalage vers le rouge de leur lumière) suggère que leurs étoiles sont, en moyenne, plus rouges que l'on ne s'y attendrait avec une galaxie très jeune. Ces objets semblent former des étoiles depuis plus de 100 millions d'années. Le télescope *Hubble* n'a pas tout à fait permis aux astrophysiciens de voir la première génération d'étoiles. Le télescope *James Webb*, prévu pour 2018, devrait leur fournir cette possibilité.

Malgré tout, *Hubble* n'a pas dit son dernier mot. Le télescope ne peut voir que jusqu'à une certaine limite de luminosité sans recourir à des temps d'exposition excessifs. Mais les « lentilles gravitationnelles » pourraient venir à la rescousse. Les objets massifs (dans ce cas, les amas de galaxies) déforment les objets situés très loin derrière – selon les lois de la relativité générale d'Albert Einstein – et parfois les grossissent. La lumière provenant d'objets lointains et peu brillants serait aussi amplifiée 10 à 20 fois.

La relativité générale au secours de *Hubble*

Les astrophysiciens ont donc traqué ces lentilles gravitationnelles avec le télescope *Hubble*. Dans le cadre du programme CLASH (*Cluster Lensing And Supernova Survey with Hubble*, Détection de lentilles gravitationnelles par des amas et relevé de supernovae avec *Hubble*), on a identifié



quelque 250 galaxies supplémentaires présentant des décalages vers le rouge compris entre 6 et 8, et une poignée d'autres dont le décalage pourrait aller jusqu'à 11.

Un nouveau projet nommé *Frontier Fields* pour *Hubble* va permettre aux astronomes de chercher des galaxies lointaines et peu lumineuses, situées derrière six amas particulièrement massifs. « Dans les trois années à venir », dit Jennifer Lotz, membre du projet, « nous allons regarder chaque amas pendant 140 orbites de *Hubble* environ (chaque orbite correspond à 45 minutes de temps d'observation), ce qui nous permettra de sonder l'Univers plus profondément que nous ne l'avons jamais fait. »

Un autre phénomène pourrait aider les astrophysiciens à sonder les débuts de l'Univers. Quand ils ont été découverts dans les années 1960, les sursauts gamma (de courtes salves de rayonnement à hautes fréquences qui apparaissent dans des directions aléatoires) étaient un mystère total. Aujourd'hui, les astronomes pensent que beaucoup d'entre eux apparaissent quand des étoiles massives meurent : elles s'effondrent en formant un trou noir et émettent des jets de rayonnement gamma. Quand ces jets heurtent les nuages de gaz environnants, ils déclenchent une émission secondaire de lumière visible et infrarouge si intense qu'elle peut être détectée par les télescopes classiques.

Nouvel espoir

Toutefois, la détection des sursauts n'est pas chose aisée. Elle commence avec l'Observatoire orbital *Swift* qui surveille le ciel, lance immédiatement une alerte en cas de détection d'un sursaut gamma et transmet les coordonnées du sursaut aux télescopes au sol qui effectuent les mesures de décalage vers le rouge. Le temps de réaction est crucial.

L'intensité des sursauts gamma surpasse celle de tous les autres objets cosmiques. Edo Berger, un astrophysicien de Harvard spécialiste des sursauts souligne « qu'ils sont probablement plus brillants que les galaxies d'un facteur un million, et qu'ils sont 10 à 100 fois plus brillants que les quasars juste après leur apparition ». Il n'y a pas besoin d'un long temps d'exposition pour les voir avec *Hubble*. En 2009, un télescope à Hawaï a mesuré pour un sursaut un décalage vers le rouge de 8,2, ce qui le place à 600 millions d'années après le Big Bang.

La cartographie des nuages d'hydrogène

Les radioastronomes ne sont pas en reste dans l'étude de l'âge sombre. Ils ont prévu de cartographier les nuages d'hydrogène neutre. Ceux-ci émettent des ondes radio qu'il sera possible de détecter avec des réseaux d'antennes tel le LOFAR (Low Frequency Array), qui comporte 50 000 antennes réparties sur cinq pays d'Europe.

Les astronomes devraient voir les nuages d'hydrogène neutre disparaître progressivement lors de la réionisation au cours du premier milliard d'années de l'histoire de l'Univers.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Loeb, L'Univers à l'âge des ténèbres, *Dossier Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011.

R. Barkana, The first stars in the universe and cosmic reionization, *Science*, vol. 313, pp. 931-934, 2006.

V. Bromm et R. B. Larson, The first stars, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 42, pp. 79-118, 2004.

J. Miralda-Escudé, The dark age of the Universe, *Science*, vol. 300, pp. 1904-1909, 2003.

L'éclair était si brillant qu'il aurait pu être vu à un décalage vers le rouge de 15 ou même 20, ce qui le placerait moins de 200 millions d'années après le Big Bang, non loin de l'époque où les toutes premières étoiles brillaient. En outre, ces étoiles massives peuvent probablement produire des sursauts gamma encore plus brillants quand elles meurent.

Les sursauts gamma ont un avantage. Les quasars n'apparaissent que dans les galaxies dotées d'un trou noir supermassif et seules les galaxies les plus brillantes sont visibles pour *Hubble*. Les sursauts, eux, sont tout aussi puissants dans les petites galaxies que dans les grandes.

Des sursauts difficiles à détecter

Mais ils présentent un inconvénient : 99 pour cent des jets qui produisent les sursauts gamma ne sont pas dirigés vers la Terre, ce qui nous empêche de les voir. Et parmi ceux qui restent et que détectent les satellites (un par jour environ), seule une minuscule fraction présente un décalage vers le rouge élevé. Pour recueillir un échantillon représentatif de sursauts à décalage vers le rouge extrêmement élevé, il faudrait une décennie, voire davantage. Il faudrait alors penser à un satellite qui remplacerait *Swift* et transmettrait les coordonnées des sursauts au télescope *James Webb* ou aux instruments au sol de la classe des 30 mètres qui devraient entrer en service dans la prochaine décennie.

Dans tous les cas, dès que le télescope *James Webb* et la prochaine génération de télescopes géants au sol commenceront à observer le ciel, les astronomes seront en mesure de cataloguer des objets beaucoup plus vieux et moins lumineux qu'aujourd'hui.

Quand les astrophysiciens ont détecté pour la première fois le rayonnement du fond diffus cosmologique en 1965, cela leur a donné une nouvelle méthode pour comprendre l'histoire de l'Univers de sa naissance jusqu'à aujourd'hui. Mais certaines périodes se sont révélées plus difficiles à étudier que d'autres. L'âge sombre en fait partie, mais les différents programmes d'observation des quasars, des sursauts gamma et des galaxies suggèrent que, d'ici quelques années, on comprendra mieux ce qui s'est passé à cette époque. ■