

Et pourtant il s'est formé. Abraham Loeb, directeur du Département d'astrophysique 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

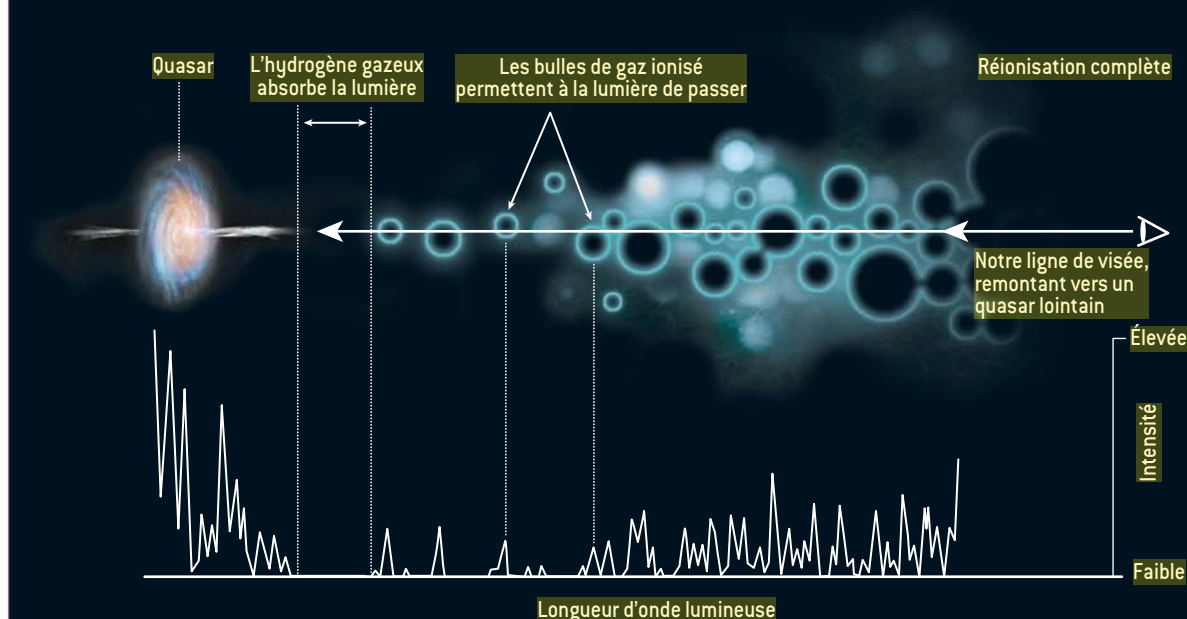
En fait, le télescope a détecté plusieurs milliers de petites galaxies peu brillantes, dont beaucoup étaient parmi les plus lointaines jamais observées. Les images suivantes du champ profond (réalisées à l'aide d'un nouvel instrument, le *Wide Field Camera 3*, installé lors d'une mission de maintenance

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

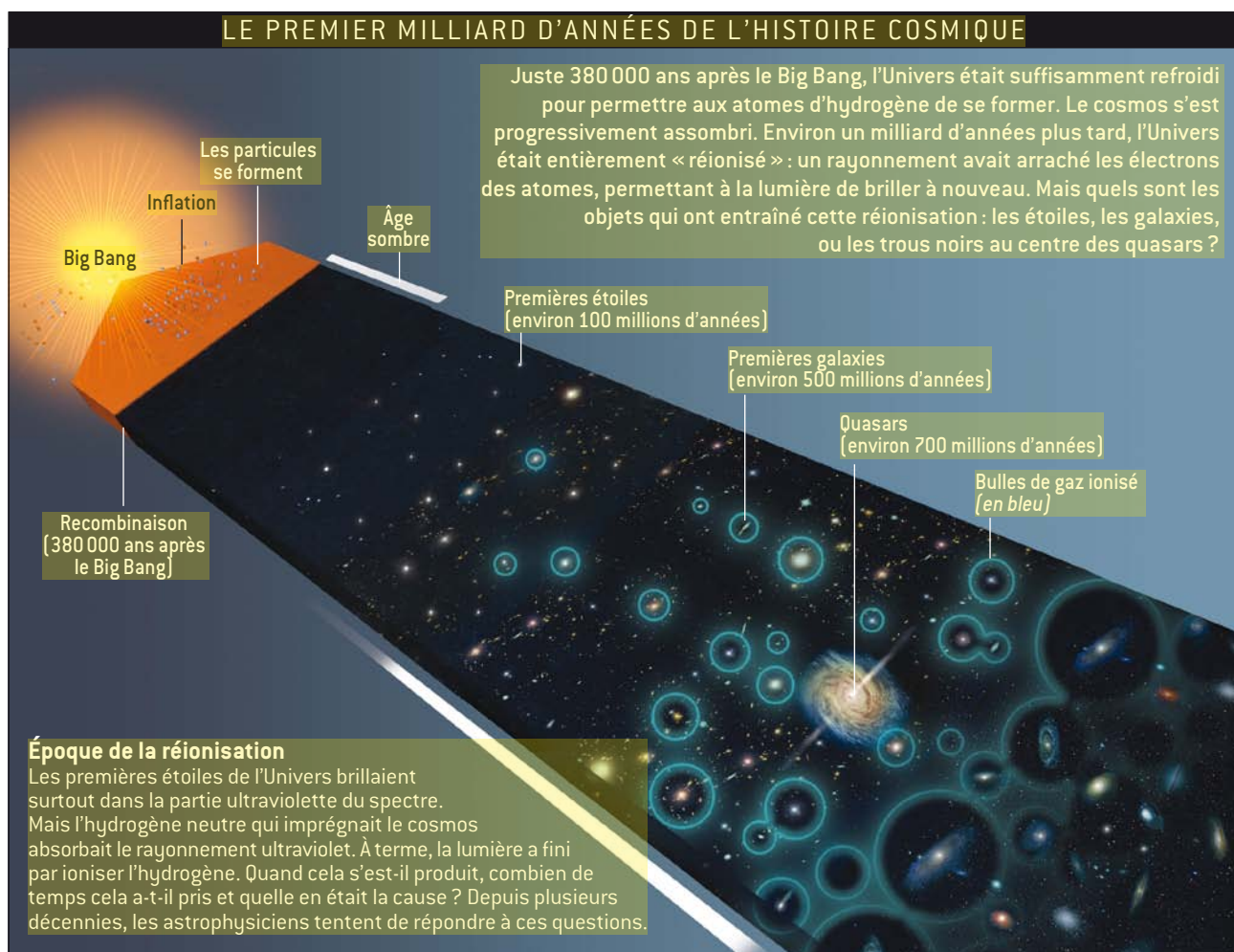
plupart des astronomes pensent maintenant que ce sont les galaxies qui ont fait l'essentiel du travail de réionisation de l'Univers.

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.**

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. ■

### ■ 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.