

■ **EN DEUX MOTS** ■ Retracer l'histoire de la formation et de l'évolution des galaxies depuis le Big Bang reste un Graal pour les astronomes. Un

scénario s'est progressivement imposé, le modèle hiérarchique : les galaxies naines seraient d'abord apparues pour s'assembler ensuite en galaxies

plus massives. Reste à le valider. Pour cela, il est nécessaire d'observer l'Univers très lointain afin de remonter jusqu'à la première flambée d'étoiles.

La quête des premières galaxies

On voit désormais l'Univers dans l'état où il était moins d'un milliard d'années après sa formation. Grâce à l'amélioration des techniques d'observation des grands télescopes et de Hubble, nous pouvons comprendre comment sont nées les premières galaxies.

CE SONDAGE de l'Univers « ultra-profond » par le télescope Hubble couvre une minuscule partie du ciel, environ un soixantième de la surface de la pleine lune.

© NASA/ESA

Daniel Schaerer est professeur à l'observatoire de l'université de Genève et chargé de recherche au CNRS.
daniel.schaerer@obs.unige.ch

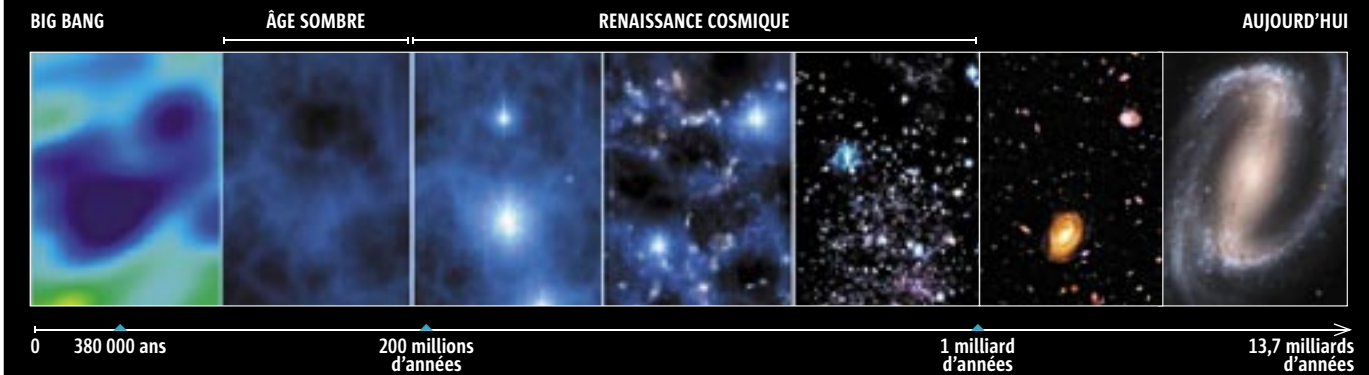
Comment et quand les premières galaxies se sont-elles formées ? Comment est-on passé d'un Univers sans planète, sans étoile, sans galaxie au ciel que nous connaissons aujourd'hui ? Selon le scénario le plus communément admis, cette transformation fondamentale se serait mise en place au cours de ce que nous appelons l'« âge sombre » de l'Univers. Cette période débute juste après le premier rayonnement émis au moment où l'Univers est devenu transparent, 380 000 ans après le Big Bang : le plasma chaud et dense des premiers instants cède la place à un milieu de matière noire, d'énergie et de gaz neutre. Ce premier rayonnement, dont on retrouve aujourd'hui la trace sous la forme d'un rayonnement micro-onde – connu sous le nom de « fond diffus cosmologique » – porte les germes des futures structures cosmiques. La matière attirant la matière, les minuscules fluctuations de densité qu'elle recèle s'amplifient. Les embryons de structure se dessinent alors. Et, après quelques centaines de millions d'années, ils sont suffisamment denses

pour que les premières étoiles et galaxies naissent. Leur rayonnement met ainsi un point final à l'âge sombre et inaugure la phase de « renaissance cosmique », que l'on appelle aussi la réionisation. Durant cet épisode, la gravité poursuivant son œuvre, les galaxies fusionnent pour devenir de plus en plus massives. Peu à peu le rayonnement émis par ces galaxies ionise tout l'hydrogène du milieu intergalactique. Ce modèle, dit de formation hiérarchique, est celui qui domine actuellement [fig. 1]. Encore faut-il le vérifier. Comme l'essentiel semble se jouer dans le tout premier milliard d'années de l'Univers, c'est cette période que les astronomes cherchent aujourd'hui à sonder. Et la course à la galaxie la plus lointaine suscite une vive compétition.

Photographier le passé

Pour remonter le temps, il nous faut, en effet, observer loin. La vitesse de la lumière étant finie, les objets nous apparaissent tels qu'ils étaient au moment où ils ont émis leur rayonnement. Cartographier des galaxies aux confins de l'Univers revient donc en

Fig.1 Scénario de formation des galaxies



SELON LE MODÈLE DU BIG BANG, après avoir émis son premier rayonnement vers 380 000 ans, l'Univers entre dans son « âge sombre ». Durant cette période, les embryons de structures nées d'infimes fluctuations de matière se densifient, puis forment, au bout de plusieurs centaines de millions d'années, les premières étoiles. Commence alors la « renaissance cosmique » encore appelée réionisation, au cours de laquelle se forment les premières galaxies. Un milliard d'années après le Big Bang, tout l'Univers est réionisé par le rayonnement des étoiles.

© NASA, ESA ET HUBBLE HERITAGE TEAM

principe à photographier directement les premières galaxies formées après le Big Bang.

À la fin des années 1970, les télescopes les plus performants permettaient d'observer des galaxies à une distance de plus de 4,5 milliards d'années lumière, l'âge de notre système solaire. Un pas décisif est franchi en 1996 avec la découverte de galaxies dites à « flambées d'étoiles », c'est-à-dire sièges d'une formation très intense d'étoiles, à environ 6 milliards d'années-lumière, par des astronomes français et canadiens grâce au télescope du CFHT installé à Hawaï. Premièrement, elle remontait presque jusqu'à la moitié de l'âge de l'Univers, que l'on situe autour de 13,7 milliards d'années. Deuxièmement, elle montrait tout l'intérêt de ce type de galaxie : le moment où une galaxie produit des étoiles est sa phase la plus brillante. La flambée produit en particulier un rayonnement ultraviolet très important, qui la rend repérable de très loin. L'espoir d'en détecter aux confins de l'Univers était né.

À partir de là, nous n'avons eu de cesse de repousser les limites de ces observations. La première difficulté est de distinguer, parmi les milliards de galaxies, celles qui sont proches de celles qui sont lointaines. L'Univers étant en expansion, toutes les galaxies s'éloignent les unes des autres. La longueur des ondes qu'elles émettent est alors dilatée par effet Doppler* : en conséquence la

lumière qui nous parvient de ces galaxies est décalée vers le rouge. Et plus une galaxie est lointaine, plus elle fuit rapidement. Résultat, son décalage est d'autant plus important. Tout repose donc sur la mesure de ce décalage vers le rouge, qui reflète la distance de la source lumineuse.

Difficile de distinguer, parmi les milliards de galaxies, les lointaines des plus proches

Deux techniques permettent de réaliser cette mesure, la spectroscopie et la photométrie. La spectroscopie consiste à mesurer le spectre d'une galaxie, c'est-à-dire à étudier en détail son rayonnement électromagnétique. Grâce à cette analyse de la distribution des photons en fonction de la longueur d'onde, on identifie ainsi des signaux caractéristiques de certains atomes, appelés des « raies spectrales ». Dans les galaxies à flambées d'étoiles, le signal souvent le plus fort est la raie dite « Lyman-alpha » émise par l'hydrogène dans l'ultraviolet, à une longueur d'onde de 121,6 nanomètres. La comparaison entre la longueur d'onde observée de la raie la plus intense – décalée vers le rouge – et sa longueur d'onde normale donne directement son décalage spectral, donc la distance qui nous sépare de la galaxie.

Rupture spectrale

La seconde approche, dite photométrique, se fonde sur une particularité des galaxies à flambées d'étoiles. Toute une partie du rayonnement ultraviolet émis par ces étoiles (aux longueurs d'onde inférieures à 121,6 nanomètres) est absorbée par les poussières

dans la galaxie émettrice ou dans le milieu intergalactique. Ainsi, ces galaxies sont comme des projecteurs lumineux que l'on ne verrait pas au-dessous d'une certaine

longueur d'onde. Cette rupture dans le spectre de la galaxie s'appelle le « *break* de Lyman-alpha ». Elle aussi est d'autant plus décalée vers le rouge que la galaxie observée est distante. La localisation de ce *break* de Lyman suffit donc pour déterminer ce décalage, et ainsi la distance. En pratique, la technique consiste ⇨

* L'effet **Doppler** est le décalage entre la fréquence de l'onde émise et de l'onde reçue lorsque l'émetteur et le récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre.

[1] J.P. Kneib *et al.*, *Astrophysical Journal*, 607, 697, 2004.

[2] R. Pelló *et al.*, *Astronomy & Astrophysics*, 416, L35, 2004.

[3] J. Richard *et al.*, *Astronomy & Astrophysics*, 456, 861, 2006.

[4] A. Bunker *et al.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 355, 374, 2004.

[5] R.J. Bouwens et G.D. Illingworth, *Astrophysical Journal*, 616, L79, 2004.

⇒ à prendre des images de galaxies à différentes longueurs d'onde et à repérer celles où elles apparaissent et celles où elles ne se voient pas [fig. 2]. Cette approche est moins précise que la spectroscopie mais elle fournit une bonne estimation de la distance. Surtout elle exige beaucoup moins de temps d'observation. La confirmation par spectroscopie des mesures photométriques reste toutefois capitale.

Sondages « ultraprofonds »

En principe, on sait donc bien mesurer la distance de ces premières galaxies à flambées d'étoiles, encore faut-il les détecter ! Plusieurs équipes internationales, dont la nôtre à l'observatoire Midi-Pyrénées et l'observatoire de Genève, ont cherché à déterminer le dispositif d'observation le plus judicieux pour les dénicher.

Imaginons que ces premières galaxies se situent à plus de 12,9 milliards d'années lumière, c'est-à-dire qu'elles soient apparues 800 000 ans après le Big Bang. À cette distance, leur rayonnement ultraviolet, décalé vers le rouge, sera observé à des longueurs d'ondes supérieures à 973 nanomètres, dans le domaine de l'infrarouge proche ! On ne les détectera donc pas dans le domaine visible. En conséquence, une caméra infrarouge est indispensable pour espérer les repérer. Pour identifier ces objets très peu lumineux, il faut aussi un grand télescope, à l'instar du VLT au Chili, et on doit le poin-

ter très longtemps sur une petite partie de ciel. C'est ce que nous appelons des sondages « ultraprofonds ». Typiquement, les temps de pause sont d'environ 6 à 10 heures par image. Plusieurs images étant nécessaires, l'acquisition des données se fait en quatre à six nuits par météo idéale. Il faut aussi obtenir en parallèle des images profondes dans le domaine du visible, afin de vérifier que les objets repérés dans l'infrarouge restent bien invisibles sur ces images.

En 2004, cette démarche a commencé à porter ses fruits. L'exploration du premier milliard d'années de l'Univers a pris alors un sérieux tournant. En moins de quatre semaines, trois publications ont pulvérisé les précédents « records ». Le 15 février 2004, une équipe menée par les chercheurs français et américains Jean-Paul Kneib et Richard Ellis a annoncé une galaxie située à 13 milliards d'années

lumière environ [1]. Leur stratégie a été de braquer le télescope spatial Hubble sur une région du ciel dans laquelle une lentille gravitationnelle avait été préa-

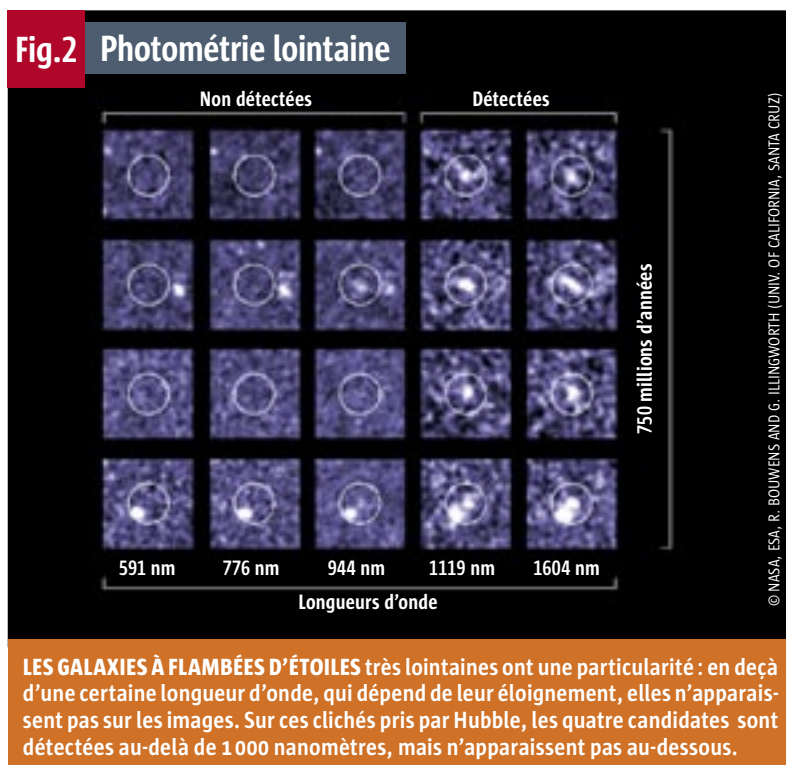
Seule une caméra infrarouge permet de repérer les plus anciennes galaxies

lablement repérée. Cette lentille, liée à la présence d'un amas de galaxies sur la ligne de visée, amplifie et déforme les rayons lumineux émis par l'objet lointain, facilitant sa détection [fig. 3].

Suivant la même stratégie et après plus de neuf mois d'analyses laborieuses, l'équipe que nous dirigeons avec Roser Pelló a publié, le 1^{er} mars, la découverte d'une galaxie candidate à 13,3 milliards d'années-lumière, c'est-à-dire ayant existé à peine 480 millions d'années après le Big Bang – même si elle a été par la suite réévaluée à une moindre distance [2, 3]. Et le 9 mars 2004, les images de l'« Ultra-Deep Field » prises par Hubble ont été mises à disposition de toute la communauté des astronomes. Ce sondage, résultat de 11,3 jours d'observations du télescope spatial, est le plus profond réalisé à ce jour. Très vite, une cinquantaine de galaxies à 12,7 milliards d'années-lumière y ont été identifiées [4]. Mais c'est seulement en septembre que Rychard Bouwens et ses collaborateurs du Lick Observatory en Californie ont trouvé trois ou quatre de ces galaxies « candidates », autour de 650-780 millions d'années après le Big Bang par photométrie [5].

Cependant, et à notre plus grande surprise, aucune autre galaxie plus jeune n'y a été découverte. En revanche, en 2006 nous avons publié une analyse détaillée de deux régions du ciel, toujours grâce à des lentilles gravitationnelles, qui a révélé 13 nouvelles galaxies « candidates » entre 12,7 et 13,3 milliards d'années-lumière.

Entre-temps, le grand télescope japonais Subaru, à Hawaï, a livré ses résultats. Grâce à sa caméra



« grand angle », fournissant des images de la taille de la pleine lune, plusieurs équipes d'astronomes japonais ont cartographié un bon nombre de galaxies à 12,8 milliards d'années-lumière. Depuis le 14 septembre 2006, les Japonais détiennent aussi le record de la galaxie la plus lointaine, à 12,9 milliards d'années-lumière, dont la distance a été établie par spectroscopie [6]. Mais ce télescope n'est pas encore équipé de caméra infrarouge permettant de dépasser cette limite. Hasard ou non, les 13 et 20 septembre, deux communiqués de presse se sont fait l'écho de nouvelles observations du satellite infrarouge Spitzer qui confirmeraient, toujours par photométrie, les galaxies « candidates » de R. Bouwens découvertes en 2004 [7].

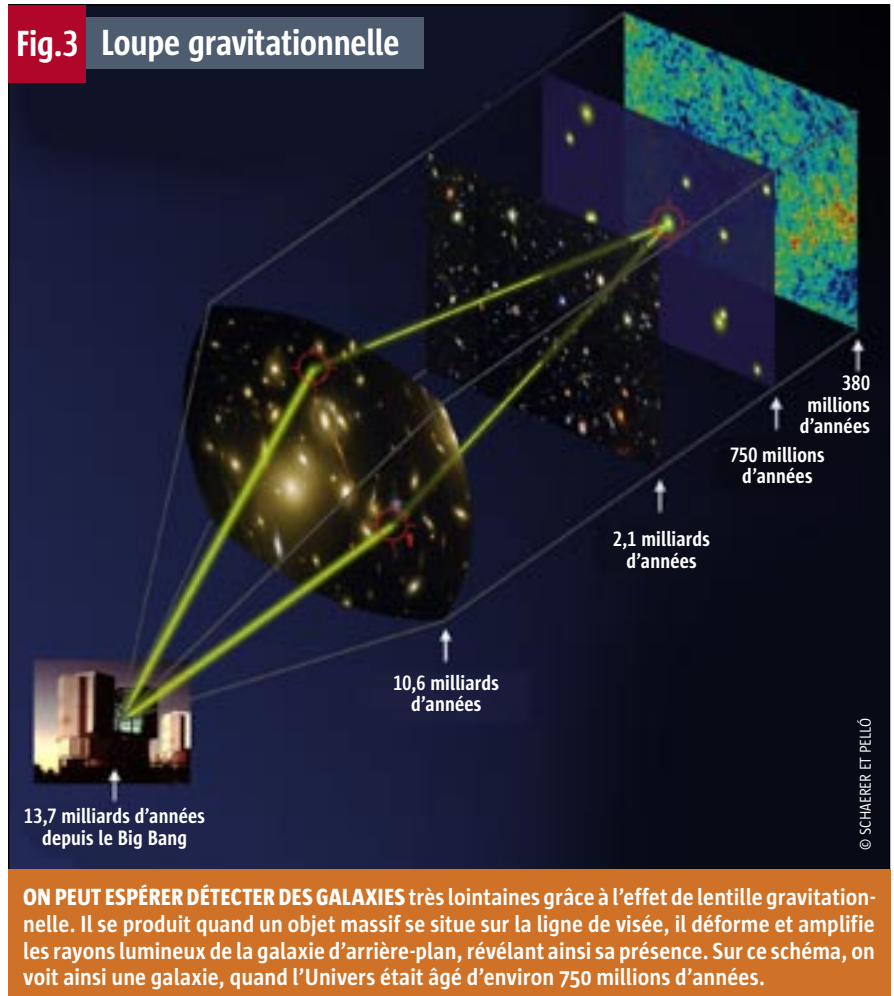
Galaxies naines

Que nous ont appris toutes ces découvertes ? Ces galaxies lointaines sont très différentes de la Voie lactée et des galaxies proches que nous connaissons. Elles sont beaucoup plus compactes. Leur taille apparente est de 3 à 6 millions d'années-lumière au maximum, soit un dixième environ de celle de la Voie lactée. Et leur faible luminosité indique qu'elles sont dix à mille fois moins massives qu'une galaxie adulte – c'est-à-dire issue de la fusion de plusieurs galaxies naines –, qui atteint autour de 1 000 milliards de masses solaires. Par ailleurs, leur couleur reflète une quasi-absence de poussières héritées d'explosions de supernovae, attestant de la jeunesse de l'Univers au moment où elles sont apparues. Enfin, elles ne possèdent vraisemblablement ni bras spiraux ni barres, typiques de galaxies déjà évoluées, un argument également en faveur d'une naissance précoce. Jusque-là, toutes ces observations cadrent donc bien, qualitativement au moins, avec le modèle de formation hiérarchique des galaxies.

Mais de nombreuses questions sont encore en suspens. Par exemple, quelle est la composition chimique des étoiles dans ces galaxies ? S'agit-il de flambées d'étoiles vraiment primordiales sans éléments lourds ? Ces étoiles sont-elles beaucoup plus massives que le Soleil, comme le suggèrent les simulations numériques ? Les galaxies observées sont-elles responsables de la réionisation cosmique ainsi que le prévoit le modèle ?

Un premier point fait débat. Il s'agit de l'évolution générale des galaxies. Autrement dit, quelle est la fraction de galaxies créatrices d'étoiles à chaque époque de l'Univers ? Or, l'analyse du champ ultraprofond de

Fig.3 Loupe gravitationnelle



ON PEUT ESPÉRER DÉTECTER DES GALAXIES très lointaines grâce à l'effet de lentille gravitationnelle. Il se produit quand un objet massif se situe sur la ligne de visée, il déforme et amplifie les rayons lumineux de la galaxie d'arrière-plan, révélant ainsi sa présence. Sur ce schéma, on voit ainsi une galaxie, quand l'Univers était âgé d'environ 750 millions d'années.

Hubble montre environ trois fois moins de galaxies à « flambées d'étoiles » que ce que notre équipe détecte sur les images du VLT. Mais d'autres arguments indirects semblent plaider en notre faveur. Selon, les mesures de la polarisation* du fond diffus cosmologique, réalisées par le satellite américain WMAP, qui donne l'état d'ionisation sur la ligne de visée, la formation stellaire aurait été déjà intense entre 200 et 600 millions d'années après le Big Bang. De plus, le satellite Spitzer a repéré des étoiles déjà « vieilles » dans des galaxies, 1,2 milliard d'années après le Big Bang. Cela laisse supposer qu'à 500-700 millions d'années ces galaxies devaient déjà exister : aurions-nous alors déjà trouvé quelques galaxies de la toute première génération ?

Quoi qu'il en soit, il nous faut comprendre pourquoi les différentes approches ne conduisent pas au même résultat. Et confirmer nos observations entre 12,7 et 13,3 milliards d'années-lumière, voire détecter des galaxies plus lointaines. La nouvelle génération d'instruments, télescopes et satellites, actuellement en construction devrait nous permettre de le faire. ■ D. S.

[6] M. Iye, et al., *Nature*, 443, 186, 2006.

[7] I. Labbé et al., *Astrophysical Journal*, 649, L67, 2006.

* La **polarisation** d'une onde électromagnétique caractérise les directions privilégiées dans lesquelles vibrent les champs électriques et magnétiques associés.

POUR EN SAVOIR PLUS

■ Le site de l'équipe des observatoires de Genève et Toulouse. <http://obswww.unige.ch/sfr/>