

déterminer leur distance. Grâce à cette technique inventée par Charles Steidel et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie, les astronomes ont compilé de vastes catalogues de galaxies très lointaines qui pourraient avoir contribué à la réionisation et dont on peut calculer la quantité totale de rayonnement émis. Malheureusement, cette technique tend à ne repérer que les galaxies les plus brillantes et, par conséquent, elle ne saurait révéler toute la contribution stellaire à la réionisation.

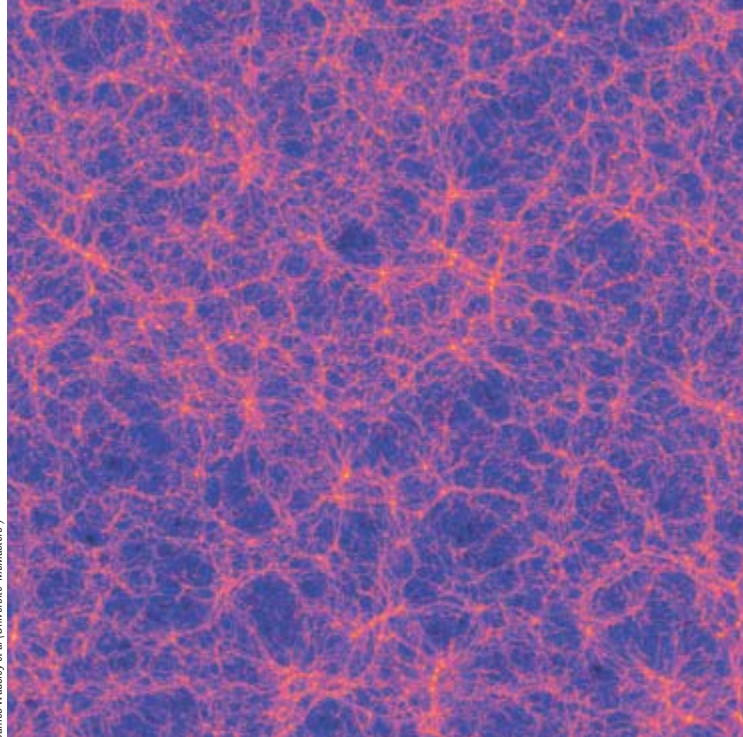
Une autre méthode consiste à examiner l'abondance et la répartition des éléments lourds. Si ces éléments sont détectés presque partout, alors la première génération d'étoiles était probablement constituée d'astres supermassifs uniformément répartis dans l'espace. Des quasars ou des galaxies naines auraient dispersé ces éléments de façon plus inégale. Cependant, les mesures sont encore trop imprécises. Pour le moment, le mieux que nous puissions faire est de placer des limites à la répartition spatiale possible du gaz. Pour cela, nous combinons l'étude des spectres de quasars avec des simulations numériques : nous changeons les paramètres de la simulation jusqu'à ce que les spectres qu'elle nous fournit ressemblent à ceux que nous observons. De cette façon, nous avons construit une image plus précise du milieu intergalactique.

Autant en emporte le vent

La troisième grande transition dans le milieu intergalactique explique la relation particulière entre la luminosité et la température du gaz chaud dans les amas de galaxies. Comme nous le verrons, cette transition est aussi liée aux phénomènes violents qui auraient secoué les régions les plus denses du milieu intergalactique et elle pourrait expliquer sa « pollution » par des éléments lourds. Le modèle le plus convaincant a été proposé, en 1991, par Nicholas Kaiser, de l'Université de Toronto. Il postula que le gaz des amas a été chauffé à des millions de kelvins avant que l'effondrement gravitationnel qui allait donner naissance aux amas de galaxies n'ait commencé. Ce réchauffement aurait dilaté le gaz des amas, réduisant sa densité et modifiant la relation entre la température et la luminosité.

Qu'est-ce qui a provoqué ce réchauffement ? Les supernovae sont les candidats les plus vraisemblables. Si une galaxie était le siège d'une succession rapide de supernovae, de la matière en serait expulsée, injectant de l'énergie, mais aussi des éléments lourds dans le milieu intergalactique. Les satellites sensibles aux rayons X ont montré que le gaz chaud des amas contient effectivement de tels éléments. De plus, la teneur en éléments lourds est approximativement la même d'un amas à un autre, quel que soit son âge, ce qui suggère que l'enrichissement s'est produit d'un seul coup, assez tôt dans la vie des amas, exactement comme le prédit le modèle de N. Kaiser. Les supernovae rendent naturellement compte de la rapidité de cet événement, puisque la première génération d'étoiles qui s'est formée dans les jeunes galaxies a dû exploser en supernovae au bout de quelques millions d'années seulement.

L'observation des galaxies naines où la natalité stellaire est élevée nous a fourni les indices les plus convaincants quant au rôle des supernovae. En effet, ces petites galaxies ayant une gravité faible, elles sont plus susceptibles que les autres de perdre de la matière au profit du milieu extérieur sous l'effet d'explosions répétées d'étoiles.

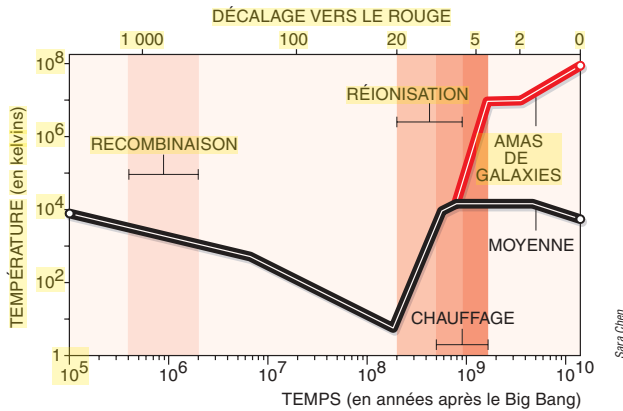


James Wadley et al (Université McMaster)

3. LA RÉPARTITION DES NUAGES INTERGALACTIQUES est obtenue en comparant les sondages réalisés à partir des spectres de quasars avec les résultats de simulations numériques telle celle-ci. Le volume d'espace simulé sur cette image fait 2,7 milliards d'années-lumière de côté pour 0,3 milliard d'années-lumière de profondeur.

Max Pettini, de l'Université de Cambridge, C. Steidel et Alice Shapley, de l'Institut de technologie de Californie, ont étudié ces galaxies en enregistrant leur spectre dans le visible et dans l'infrarouge. Les spectres visibles contenaient deux types de raies : des raies d'émission provenant de l'hydrogène et des raies d'absorption dues à des éléments lourds. Les spectres infrarouges ne contenaient qu'un seul type de raies, émises par les nébuleuses gazeuses dans chaque galaxie.

M. Pettini et ses collègues ont découvert que, dans chaque galaxie naine, ces trois types de raies étaient différemment décalées vers le rouge par l'effet Doppler : les éléments lourds l'étaient moins que l'émission infrarouge de la galaxie, tandis que l'hydrogène l'était plus. On interprète ce phénomène en imaginant que ces raies sont produites par un flux de gaz émis vers l'extérieur par la galaxie, un vent cosmique galactique soufflant dans l'espace. Ce vent contient à la fois de l'hydrogène et des éléments lourds, mais ces différents constituants ne sont pas visibles dans les mêmes régions. Pour que les raies d'absorption des éléments lourds soient décelables, les atomes doivent se situer entre la galaxie et nous, afin d'être éclairés « par derrière ». Ainsi, on n'observe que les éléments lourds qui sont portés par le vent galactique émis dans notre direction : leur vitesse de fuite est moindre que celle de la galaxie-hôte et leur spectre nous apparaît moins décalé vers le rouge que celui de la galaxie. Quant à l'hydrogène, nous ne captions sa raie d'émission que si elle provient du vent émis de l'autre côté de la galaxie. Voici pourquoi : la vitesse du vent s'ajoute alors à la vitesse de fuite de la galaxie, de sorte que cette raie est plus décalée vers le rouge que le reste du spectre galactique. C'est ce décalage supplémentaire de la lumière qui lui permet de traverser la galaxie-hôte dans notre direction sans être réabsorbée par l'hydrogène qu'elle rencontre sur son chemin.



4. L'HISTOIRE THERMIQUE du milieu intergalactique révèle trois transitions importantes : la recombinaison, la réionisation et une phase de chauffage qui a commencé un peu avant la formation des amas de galaxies, probablement sous l'effet des premières supernovae qui explosèrent dans les galaxies naines, engendrant des « tempêtes cosmiques » de gaz chaud.

Lorsque les conditions d'observation le permettaient, on a observé ce type de spectre pour toutes les galaxies naines très lointaines. Ceci confirme qu'autrefois, de tels vents cosmiques, probablement propulsés par des explosions de supernovae, étaient monnaie courante. De plus, dans certaines galaxies plus proches, les astronomes ont détecté de gigantesques jets de matière propulsée dans le milieu intergalactique. Récemment, Crystal Martin et ses collègues de l'Université de Santa Barbara ont constaté que la galaxie naine NGC 1569 laisse s'échapper dans le milieu intergalactique d'énormes quantités d'oxygène et d'autres éléments lourds sous forme de bulles de gaz chauffé à plusieurs millions de kelvins.

Une activité autorégulée

Les vents cosmiques émis par les plus petites des galaxies primordiales sont certainement responsables du réchauffement et de la dilatation du gaz dans les régions les plus denses du milieu intergalactique. De ce fait, les plus petits grumeaux du milieu intergalactique ont été dans l'incapacité de s'effondrer davantage et ce mécanisme a empêché la formation des galaxies de masse trop faible. Ainsi, les transformations induites par cette troisième transition ont été plus importantes encore que celles qui ont suivi la réionisation. Cette dernière a entravé la formation de galaxies de masse inférieure à quelques centaines de millions de masses solaires, tandis que les vents galactiques ultérieurs ont certainement dispersé des embryons galactiques dix fois plus massifs. Ce mécanisme explique peut-être l'un des mystères de la cosmologie moderne : toutes les simulations numériques de la formation des structures prédisent beaucoup plus de petites galaxies qu'il n'en existe effectivement.

Ainsi, chaque génération d'objets a agi sur le milieu intergalactique qui, en retour, a déterminé les propriétés des objets de la génération suivante. Étoiles supergéantes, quasars ou simples galaxies, les sources qui ont réionisé l'Univers ont engendré assez de pression thermique pour ralentir la formation d'objets compacts leur ressemblant, ce qui a mis fin à la réionisation. Par la suite,

les vents cosmiques émis par les galaxies naines ont chauffé le gaz intergalactique dans les amas de galaxies... et empêché la formation de nouvelles générations de galaxies naines. De tels mécanismes de rétroaction qui régulent l'activité du cosmos se produisent également, à plus petite échelle, dans les galaxies elles-mêmes où les supernovae et les rayons ultraviolets émis par les jeunes étoiles massives agissent sur le milieu interstellaire et ralentissent la formation de nouvelles étoiles massives. L'idée de rétroaction devient un concept unificateur en astronomie, car il semble se répéter à différentes échelles.

Que nous réserve l'avenir ? De nouvelles techniques sont mises au point pour le découvrir. Nous observons le fond de rayonnement cosmologique à travers le milieu intergalactique proche où baigne notre galaxie. Ce milieu imprime au fond de rayonnement un léger flou que nous sommes désormais en mesure de déceler. On pense que la présence de grumeaux dans ce milieu devrait aussi diffuser les photons du rayonnement fossile et que des zones de température élevée dans les amas de galaxies le déforment encore davantage. Ce dernier mécanisme, nommé effet Sunyaev-Zeldovich, a été observé dans certains amas et l'on pense que les images fournies par l'expérience d'imagerie du rayonnement de fond cosmologique (*Cosmic Background Imager Experiment*) l'ont également mis en évidence. Par ailleurs, à l'aide d'une méthode analogue à l'étude des spectres de quasars, Kenneth Sembach, de l'Institut scientifique du télescope spatial, ainsi que Blair Savage, Bart Wakker et leurs collègues de l'Université Wiskonsin-Madison ont sondé le milieu intergalactique dans le voisinage immédiat de la Voie lactée. Leurs observations suggèrent que le gaz intergalactique proche est réparti de façon hétérogène selon un motif très semblable, quoi qu'à plus petite échelle, à celui de la toile cosmique de filaments qui s'étend entre les amas de galaxies. Ce milieu assez froid évolue lui-même dans un plasma porté à un million de kelvins qui est semblable au gaz chaud des autres amas. Ainsi, le Groupe local de galaxies, l'amas dont fait partie la Voie lactée, serait entouré d'une couronne de gaz dont les propriétés sont semblables à la fois à celles des régions les plus denses du milieu intergalactique et à celles des régions les plus ténues. Serait-il possible qu'à très grande échelle, les bulles vides qui s'étendent entre les nuages du milieu intergalactique soient, elles aussi, emplies d'un gaz très chaud que nous n'aurions pas encore observé ? Ce gaz pourrait-il constituer une partie importante de la masse du milieu intergalactique ? De nouvelles études seront nécessaires, car nous commençons tout juste à reconstituer l'histoire du milieu intergalactique.

Evan SCANNAPIECO est astronome à l'Observatoire Arcetri de Florence. Patrick PETITJEAN est astronome à l'Institut d'astrophysique de Paris-CNRS. Tom BROADHURST est professeur à l'Université de Jérusalem.

P. PETITJEAN, J. MÜCKET et R. KATES, *The Lyman-alpha Forest at Low-Redshift : Tracing the Dark Matter Filaments*, in *Astronomy & Astrophysics*, vol. 295, n° 1, pp. L9-L12, mars 1995.

E. SCANNAPIECO et T. BROADHURST, *The Role of Heating and Enrichment in Galaxy Formation*, in *Astrophysical Journal*, vol. 549, n° 1, pp. 28-45, mars 2001.