

sa structure magnétique. Lorsque les électrons se déplacent au travers de régions magnétisées, ils émettent du rayonnement dans le domaine radio. Cette émission est polarisée dans la même direction que le champ magnétique. Malheureusement, la très faible densité du milieu intergalactique rend ce signal extrêmement faible. En 1989, Kwang Tae Kim, Philipp Kronberg et leurs collègues de l'Université de Toronto ont découvert un pont diffus de matériau magnétisé reliant deux amas de galaxies. Toutefois, de telles mesures n'ont pas encore pu être étendues à des régions plus profondes de l'espace. Pour l'essentiel, les astronomes se contentent d'extrapoler au milieu intergalactique les indices qu'ils tirent des grandes galaxies et des amas. En effet, la plupart des galaxies spirales sont dotées de champs magnétiques très ordonnés qui devraient être assez puissants pour entraver leur formation et modifier leur rotation. On pense que ces champs magnétiques préexistaient à leur galaxie hôte sous une forme beaucoup moins intense, puis qu'ils ont été amplifiés par un effet dynamo lié à la rotation du plasma dans les disques galactiques à mesure que les galaxies croissaient. Cette hypothèse suppose, par conséquent, l'existence de zones faiblement magnétisées dans le milieu intergalactique. Par ailleurs, sur de plus grandes échelles, les études dans le domaine radio ont révélé un gaz magnétisé diffus dans plusieurs amas de galaxies voisins. L'ensemble de ces observations suggère que le milieu intergalactique dans son ensemble est magnétisé.

Les trois grandes transitions

Toutes ces informations sont, certes, incomplètes, mais elles indiquent que le milieu intergalactique a subi au moins trois grandes transitions au cours de l'histoire cosmique. La première de ces transitions, celle qui a eu lieu 300 000 ans après le Big Bang, est celle que nous comprenons le mieux. C'est

l'événement qui a provoqué l'émission du fond de rayonnement micro-onde, et elle est nommée recombinaison.

La seconde transition, d'un état neutre vers un état ionisé, est moins bien comprise. Cette réionisation pourrait avoir été causée par la formation des quasars, par les jeunes étoiles massives et brûlantes qui sont apparues dans les premières galaxies, ou bien encore par une hypothétique première génération d'étoiles supergéantes qui auraient été réparties à peu près uniformément dans l'espace (mais dont nous n'avons encore détecté aucun exemplaire). Dans chaque cas, le rayonnement très énergétique de ces astres aurait arraché les électrons des atomes du gaz intergalactique. Il ne semble pas que cet événement ait pu influencer notablement sur la formation des grandes galaxies massives, mais la pression d'origine thermique qu'il a engendrée pourrait avoir été suffisante pour empêcher la formation de structures plus petites. Ceci modifie déjà le scénario simpliste selon lequel la gravitation serait intervenue seule dans la structuration de l'Univers.

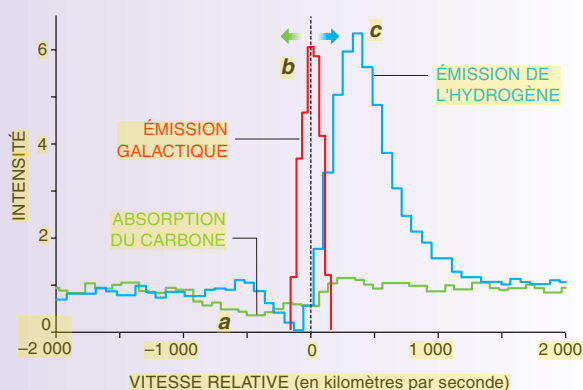
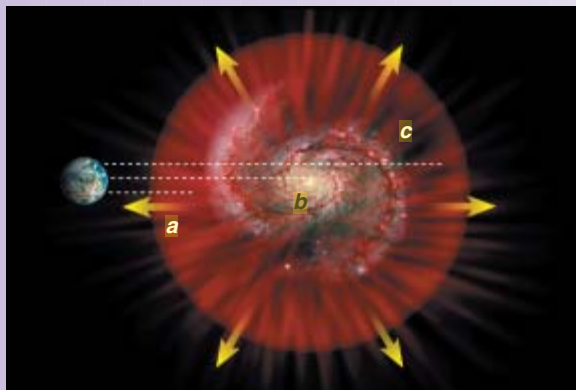
Quelles furent les contributions respectives à la réionisation des quasars, des étoiles primordiales supergéantes et des jeunes étoiles formées dans les premières galaxies ? Les astronomes n'ont pas encore pu le déterminer. Les meilleures mesures de la contribution des étoiles s'appuient sur l'observation des galaxies dites de la « coupure Lyman-alpha ». Ces objets sont ainsi nommés parce que leur spectre présente une coupure abrupte due à l'absorption de la lumière par l'hydrogène neutre qu'ils contiennent. Pour les galaxies les plus lointaines, la position de cette coupure est fortement décalée vers le rouge, de sorte qu'elle se trouve dans le visible plutôt que dans l'ultraviolet. Ainsi, en recensant les astres qui présentent cette coupure dans le visible, les astronomes identifient rapidement une grande quantité de galaxies lointaines sans recourir aux délicates mesures de décalage vers le rouge qui sont normalement nécessaires pour

Les vents galactiques

La meilleure preuve que les galaxies naines émettent un vent de matière dans le milieu intergalactique provient de l'étude de leur spectre. Le vent est révélé par l'existence de trois sortes de raies provenant de l'avant-plan, de l'arrière-plan et de la galaxie elle-même.

Lorsque la lumière émise par la galaxie voyage vers la Terre, elle traverse des nuages d'éléments lourds, tel le carbone, qui absorbent certaines longueurs d'onde caractéristiques. Ces nuages se déplacent vers nous (a), de sorte que leur spectre est moins décalé vers le rouge que celui de la galaxie. Ce spectre galactique est donné par

l'émission des nébuleuses au sein de la galaxie elle-même qui émettent un rayonnement infrarouge servant de référence de vitesse (b). L'hydrogène emporté par le vent qui souffle à l'opposé de la galaxie émet également de la lumière (c). À cause du mouvement de ce vent, le spectre de cette lumière est davantage décalé vers le rouge que celui de la galaxie. Ce décalage a comme effet secondaire de conférer une si grande longueur d'onde à la raie de l'hydrogène, qu'elle peut traverser la galaxie dans notre direction sans être réabsorbée, raison pour laquelle on peut l'observer.



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.

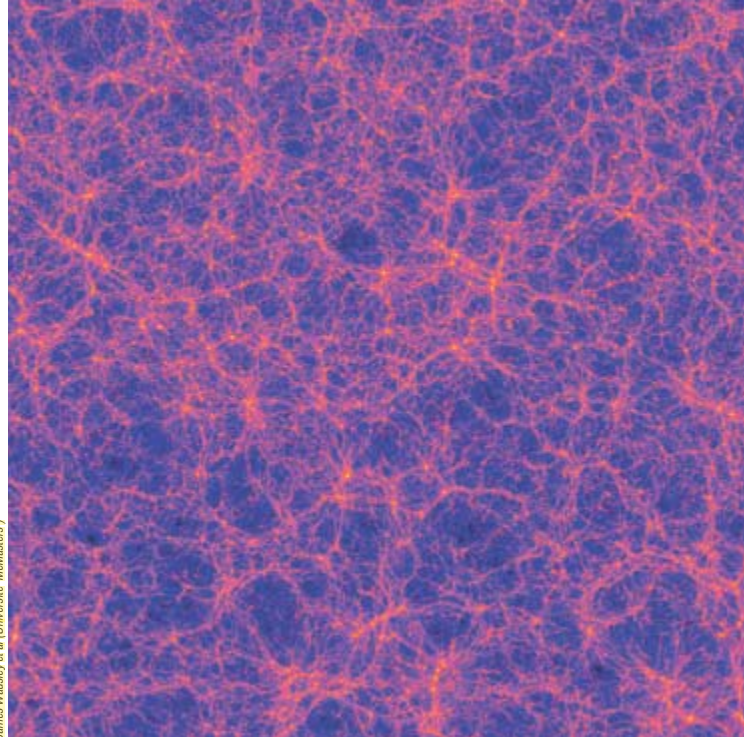
Une autre méthode consiste à examiner l'abondance et la répartition des éléments lourds. Si ces éléments sont détectés presque partout, alors la première génération d'étoiles était probablement constituée d'astres supermassifs uniformément répartis dans l'espace. Des quasars ou des galaxies naines auraient 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.



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.