

dans le corps humain (le sang est chaud et humide, la colère chaude et sèche, la mélancolie froide et sèche, le flegme froid et humide) et dont l'excès crée les maladies. De surcroît, la domination de l'un de ces fluides définit le tempérament d'un individu, qui peut être qualifié de sanguin, de colérique, de mélancolique ou de flegmatique. Les équilibres sont susceptibles d'être modifiés – ou les déséquilibres aggravés – par l'intervention de diverses circonstances externes, par exemple la saison ou l'âge : une nourriture échauffante à base d'épices devra être recherchée par les vieillards en hiver, mais elle est déconseillée aux jeunes gens en été. On comprend mieux pourquoi les cucurbitacées, réputées froides et humides, conviennent aux flegmatiques, dominés par les mêmes qualités, tout en étant recommandées contre les fièvres qui entraînent un excès de chaleur. Ces *Régimes* sont appliqués par les médecins, tel Arnaud de Villeneuve, ce qui indique le prestige des ouvrages de diététique. La résurgence de la peste n'est sans doute pas étrangère à l'attention que portent les médecins aux conduites alimentaires. Il s'agit à la fois de soigner et de conserver la santé : manger est un acte curatif et (surtout) préventif.

Le triomphe de la diététique

En composant des traités diététiques, les médecins répondent à un souci du corps répandu dans la société médiévale, mais ils doivent composer avec l'obstination des goûts et les ruses du désir alimentaire. Un auteur admet ainsi que les malades atteints de fièvre peuvent se lasser de ne manger que l'intérieur des tourtes qu'il leur prescrit : il consent alors à ce qu'on leur serve la pâte, en théorie vivement déconseillée, à condition qu'elle ait été confectionnée la plus légère possible.

Les nobles et les aristocrates mangent beaucoup, mais ils se doivent aussi de manger mieux que les autres. Au sommet des préférences figurent les volailles, du chapon au poulet. Viennent ensuite les agneaux, veaux et chevreaux. Les ovins sont réputés meilleurs que les bovins ; les porcins, notamment lorsqu'ils sont salés, figurent tout en bas de la hiérarchie. Sont également déconsidérés les légumes, alors que les fruits font au contraire l'objet d'achats réguliers dans les maisons nobles.

C'est que les fruits poussent en général sur des arbres, quand les légumes viennent de la terre. Or, les philosophes médiévaux de la nature ont emprunté à l'Antiquité l'idée selon laquelle l'univers s'ordonne verticalement, depuis les objets inanimés jusqu'à Dieu ; les plantes et les animaux sont classés selon le milieu dont ils sont issus et où ils se meuvent : les végétaux figurent en bas de cette « Grande Chaîne de l'être » dont les volatiles occupent les parties supérieures. Parmi les végétaux, le même principe hiérarchique conduit à valoriser les arbres fruitiers par rapport aux arbustes à baies, eux-mêmes situés au-dessus des feuilles poussant sur une tige (chou, pois, menthe) qu'on ne saurait confondre avec les feuilles partant de la racine (les épinards, les salades et les cardes). Les plus méprisés des végétaux sont les racines (carottes, raves) et les bulbes (oignon, échalote, poireau, ail) qui croissent sous la terre : ce sont les aliments des rustres.

Tous ces éléments devaient concourir à l'apparition d'un discours gastronomique. Les historiens ont constaté que celui-ci n'émerge qu'à la fin du Moyen Âge, quand les préventions des théologiens à l'égard de la *gula* – le péché « de gueule » – se sont affaiblies. Pour les hommes d'Eglise, toutes les viandes ont le redoutable inconvénient d'échauffer



5. LES PRODUITS RÉGIONAUX ont déjà une renommée bien établie. Ici, une cliente choisit soigneusement des poires.

le mangeur et de le conduire inévitablement à la luxure. L'Eglise prône la mesure et la modération, voire l'ascèse. Pourtant s'il n'est pas encore question de faire l'apologie des plaisirs de la table, on voit sourdre progressivement des préoccupations gastronomiques... au détour d'ouvrages censés condamner ces plaisirs, ou au moins censés rappeler les cadres religieux dans lesquels ils doivent se cantonner. La dérision propre aux pièces comiques est l'un des biais par où s'insinue le discours gastronomique de la fin du Moyen Âge. On ne compte plus les pseudosermons ou les Vies de saints qui pastichent de prestigieux modèles en traitant de manière burlesque, qui du boudin, qui du quartier de mouton. Citons l'exemple d'une *Vie de saint Hareng*, supposé avoir été martyrisé de mille manières, selon des préparations qui devaient évoquer des réalités précises et savoureuses dans l'esprit des lecteurs. Énumérations et digressions gastronomiques abondent dans les œuvres, et cette invasion de thèmes alimentaires traduit à l'évidence un vif intérêt pour les choses de la table.

Au Moyen Âge, il existait des connaisseurs faisant et dé faisant la réputation des plats et des produits. Ces gastronomes se permettaient progressivement une jouissance de plus en plus insolente et explicite des plaisirs de la table... Pour qu'un discours gastronomique prenne forme, il ne restait plus qu'à rassembler le matériau culinaire et les préoccupations diététiques. Ce sera l'œuvre, dans les années 1460, de l'humaniste italien Platina, dont le *De Honesta Voluptate* connaîtra au XVI^e siècle un immense succès dans toute l'Europe. On peut y retrouver les caractéristiques de la gastronomie romaine, mais on y lit aussi le bilan d'une gastronomie médiévale riche et innovante.

Bruno LAURIOUX est historien. Maître de conférences à l'Université Paris 1-Panthéon-Sorbonne, il est secrétaire de l'Institut européen d'histoire de l'alimentation.

Odile REDON, Françoise SABBAN et Silvano SERVENTI, *La gastronomie au Moyen Âge. 150 recettes de France et d'Italie*, Stock, 1991.

Bruno LAURIOUX, *Manger au Moyen Âge. Discours et pratiques alimentaires aux XIV^e et XV^e siècles*, Hachette, 2002.

Le milieu intergalactique

EVAN SCANNAPIECO • PATRICK PETITJEAN • TOM BROADHURST

L'Univers est essentiellement constitué de vide : la densité du milieu intergalactique est 100 000 fois inférieure à celle du milieu interstellaire. Pourtant, ce gaz raréfié joue un rôle primordial dans l'évolution cosmique.

Le vide interplanétaire du Système solaire fait figure de dense atmosphère tropicale lorsqu'on le compare aux étendues entre les étoiles. Il existe pourtant des espaces encore plus désertiques que le milieu interstellaire. L'océan de nuit qui s'étend au-delà de notre galaxie ne mérite même pas le nom de gaz : sa densité, 100 000 fois inférieure à celle du milieu interstellaire, n'est que de dix atomes par mètre cube ! En fait, la différence de densité est plus grande entre le milieu interplanétaire et le vide intergalactique qu'entre l'air et l'eau !

On penserait que les astronomes qui consacrent leur carrière à l'étude du milieu intergalactique donnent au mot «ennui» la plénitude de sons sens ! Ce préjugé est d'autant plus excusable que les astrophysiciens l'ont partagé pendant longtemps. Cependant, au cours des deux dernières années, leur attitude a profondément changé. Il apparaît désormais que le milieu intergalactique, pour ténu et raréfié qu'il soit, est la principale scène où se joue l'évolution cosmique.

Le milieu intergalactique préexistait aux galaxies. Aux premiers temps de l'histoire cosmique, toute la matière se trouvait sous la forme d'un plasma chaud indifférencié emplissant tout l'espace. L'essentiel de ce gaz, refroidi par l'expansion universelle, s'est condensé en une myriade de galaxies et d'amas de galaxies. La matière restante est désormais condamnée à se diluer éternellement ou à rejoindre, finalement, l'un des astres qui peuplent l'Univers. Ceci est connu depuis longtemps. Toutefois, les astrophysiciens imaginaient qu'il ne servait à rien d'étudier en détail l'organisation de la matière intergalactique. Pour eux, la gravitation, responsable de la condensation des galaxies et de leurs interactions, régnait seule sur l'évolution de l'Univers : une fois que le milieu intergalactique était passé de son état chaud ionisé à un état plus froid constitué d'hydrogène et d'hélium neutre, il n'offrait aucune résistance notable à l'attraction gravitationnelle. Les régions légèrement plus denses que leur voisinage se contractaient et attiraient la matière environnante selon un mécanisme encore actif aujourd'hui.

Ainsi, selon ce scénario, les densités, les positions et les tailles des galaxies et des amas de galaxies ne dépendaient que de la répartition aléatoire initiale de la matière. Même si le milieu intergalactique avait eu une structure interne complexe – chose à laquelle, par ailleurs, personne ne croyait vraiment – cela n'aurait eu aucune conséquence sur la formation et l'évolution des objets vraiment intéressants du cosmos. C'est cette idée qui est remise en cause aujourd'hui.

La forêt spectrale

Nous avons découvert que le délicat matériau intergalactique est assemblé en un vaste réseau de feuilles et de filaments gazeux où les galaxies s'accrochent telles les gouttes de rosée sur une toile d'araignée. Surtout, nous savons maintenant que ce milieu a une histoire complexe marquée par plusieurs transitions qui ont joué un rôle essentiel lors de la formation des grandes structures de l'Univers. Les indices qui nous ont conduits à cette conclusion reposent sur quatre types d'observations que nous allons examiner : le fond de rayonnement cosmologique, les spectres des quasars, les rayons X émis par le gaz chaud dans les amas de galaxies et les mesures de champs magnétiques galactiques.

Le fond de rayonnement cosmologique est le mieux connu de ces indices. Il nous fournit un instantané du milieu intergalactique au moment où, sa température tombant en dessous de 4 000 kelvins, il est passé de l'état de gaz ionisé à celui de gaz neutre, 300 000 ans environ après le Big Bang. La structure des fluctuations de densité que l'on y observe constitue le point de départ de tous les modèles du milieu intergalactique.

Les spectres des quasars nous ont fourni un second indice. On pense que les quasars sont de jeunes trous noirs supermassifs peuplant le cosmos lointain et, par conséquent, primitif. Ce sont des sources extrêmement lumineuses, de véritables phares, capables d'éclairer les immenses tranches d'espace qui nous en séparent. La matière intergalactique sur la ligne de visée d'un quasar absorbe certaines longueurs d'onde spécifiques qui nous renseignent sur sa nature. Toutefois, l'interprétation des spectres d'absorption des quasars est un peu délicate. Ces spectres contiennent des raies qui ne semblent correspondre à aucune substance connue. Cette anomalie est due à l'expansion de l'Univers qui, en étirant les ondes lumineuses issues de sources lointaines déplace les raies spectrales vers les grandes longueurs d'onde selon un mécanisme nommé décalage vers le rouge. Plus la source de la lumière est lointaine, plus l'Univers a eu de temps pour se dilater entre le

1. LES GALAXIES sont réparties dans l'Univers à la manière de gouttes de rosée sur une toile d'araignée. Sur cette vue d'artiste, leur éclat souligne les filaments et les feuillets de matière qui s'étendent à travers l'espace intergalactique. Bien que le milieu qui constitue ces filaments soit extrêmement ténu – sa densité est de l'ordre de dix atomes par mètre cube – ses échanges de matière et d'énergie avec les galaxies pourraient avoir déterminé l'essentiel de l'histoire de l'Univers.



moment de l'émission et celui de l'observation, et plus le décalage vers le rouge est important.

Ces spectres de quasars ont été observés pour la première fois au milieu des années 1960, et, à la fin des années 1970, on disposait de spectres de très bonne qualité. Alec Boksenberg, de l'Université de Londres, et Wallace Sargent, de l'Institut de technologie de Californie, constatèrent que ces spectres contiennent des centaines de raies d'absorption formant, sur les graphiques d'enregistrement, d'épaisses futaies de lignes verticales, qui furent nommées «forêts Lyman-alpha». Lyman-alpha est le nom de la raie d'absorption de l'hydrogène neutre qui est responsable de cette «forêt». Le fait que cette raie apparaisse à différents endroits du spectre montre que l'espace entre nous et le quasar est rempli de centaines de nuages d'hydrogène, chacun situé à une distance différente et, par conséquent, subissant un décalage vers le rouge différent (voir l'encadré ci-dessous).

Le gaz neutre absorbe naturellement des raies plus ou moins larges en fréquence, car l'agitation thermique aléatoire des atomes décale chacun de leurs spectres par effet Doppler. Les raies d'absorption qui devraient être des lignes mathématiques idéalement fines sont élargies et acquièrent une largeur notable. En 1965, James Gunn et Bruce Peterson, de l'Institut de technologie de Californie, calculèrent la largeur théorique de l'absorption Lyman-alpha à partir de la densité du gaz intergalactique. Ils montrèrent qu'elle était suffisante pour que les raies de la forêt Lyman-alpha se recouvrent et, par conséquent, que l'on devrait observer un large domaine continu d'absorption plutôt qu'une série de raies distinctes. Ils en déduisirent que la densité de l'hydrogène neutre responsable de l'absorption était

beaucoup plus faible que la densité totale du milieu intergalactique : les atomes d'hydrogène ne sauraient constituer plus d'une partie par million dans le milieu intergalactique, le reste étant formé d'hydrogène et d'hélium ionisés, transparents dans ce domaine de fréquence.

Ainsi, la simple présence de la forêt Lyman-alpha montre que le gaz intergalactique est en grande partie ionisé, et ceci depuis fort longtemps, puisqu'on l'observe jusqu'à des décalages vers le rouge très importants. Le milieu froid et neutre qui s'est formé après l'émission du fond de rayonnement cosmologique et qui a présidé à la formation des galaxies a dû avoir une existence très brève. Quelque chose a reionisé ce gaz avant que les premiers quasars ne se forment. L'année dernière, les astronomes ont fait une importante découverte en observant le quasar SDSSJ103027.10+052455.0, l'un des plus anciens que l'on connaisse. Robert Becker et ses collègues de l'Université de Californie ont constaté que son spectre contient un domaine d'absorption Lyman-alpha continu qui est peut-être le premier exemple de la bande d'absorption prédite par J. Gunn et B. Peterson. On pense que cette bande d'absorption nous donne un aperçu de cette période reculée au cours de laquelle la reionisation n'était pas encore achevée.

Les spectres des quasars nous renseignent sur la densité et sur l'état d'ionisation du milieu intergalactique, mais aussi sur la répartition de la matière dans ce milieu. On peut considérer chaque forêt Lyman-alpha comme une «carotte» creusée dans l'Univers à la façon dont on prélève une carotte de glace dans la banquise. En comparant les carottes obtenues dans différentes directions et en les confrontant à des simulations numériques qui tentent de reproduire la

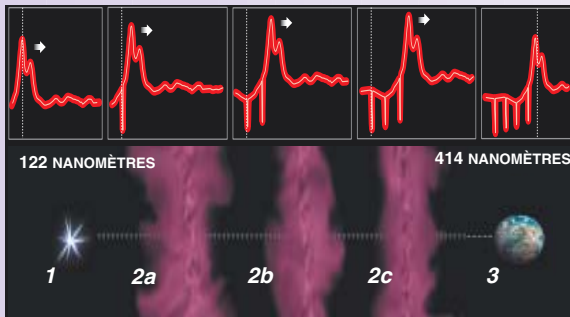
La forêt Lyman-alpha

Aussi tenu soit-il, le gaz intergalactique trahit sa présence en absorbant la lumière des objets éloignés, notamment les quasars qui sont les sources lumineuses les plus puissantes de l'Univers. Comme les verres teintés, les nuages de gaz absorbent certaines longueurs d'onde, mais laissent passer le reste. Le mécanisme se manifeste par une série de lignes d'absorption dans les spectres des quasars. Sur ces spectres, les lignes d'absorption sont si nombreuses que les astronomes parlent de «forêt Lyman-alpha».

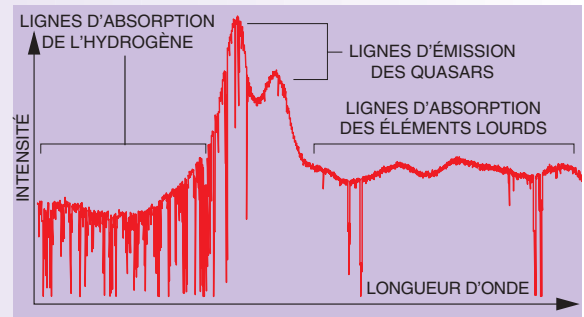
La lumière émise par le quasar a initialement un spectre à peu près continu (courbe en rouge). Son pic d'intensité correspond à une raie produite par l'hydrogène neutre à 122 nanomètres de longueur d'onde, nommée raie Lyman-alpha. Tandis que la lumière traverse l'Univers vers la Terre (de 1 à 3), deux effets modifient son spectre. Tout d'abord,

l'expansion cosmique le décale vers les grandes longueurs d'onde. Ensuite, chaque nuage d'hydrogène intergalactique y imprime une nouvelle raie d'absorption (2a, 2b et 2c). Chacune de ces raies est initialement absorbée à 122 nanomètres avant d'être à son tour décalée avec le reste du spectre.

Lorsque la lumière arrive sur Terre, le spectre du quasar est marqué par des centaines de raies dues à l'hydrogène et, occasionnellement, à quelques éléments plus lourds. Le pic de ce spectre, issu du quasar HE 1122-1628, a été décalé de sa position originelle à 122 nanomètres jusqu'à une longueur d'onde de 414 nanomètres. Ce décalage vers le rouge indique une distance de l'ordre de dix milliards d'années-lumière. Les lignes d'absorption de la forêt Lyman-alpha indiquent le nombre de nuages traversés sur ce parcours.



LE SPECTRE D'UN QUASAR est décalé vers le rouge à mesure que sa lumière progresse vers la Terre. Chaque nuage d'hydrogène rencontré sur son trajet imprime une raie d'absorption



tion à 122 nanomètres qui est ensuite décalée avec le reste du spectre. Ainsi, on observe une forêt de raies correspondant au nombre de nuages traversés.

formation des grandes structures, les astrophysiciens ont reconstitué la répartition tridimensionnelle de la matière entre les galaxies. Par ailleurs, il arrive que des objets massifs soient situés sur la ligne de visée d'un quasar dont ils dévient la lumière. De ce fait, l'image du quasar est démultipliée et nous recevons plusieurs carottes prises dans des directions du ciel très proches, mais distinctes, ce qui permet de sonder le milieu intergalactique de façon plus fine. Grâce à cette méthode, Michael Rauch des observatoires Carnegie, à Pasadena, W. Sargent et Thomas Barlow, de l'Institut de technologie de Californie, ont mis en évidence des mouvements au sein du gaz intergalactique. Même si l'essentiel de ce milieu est calme, il semble que les zones les plus denses ont été secouées à plusieurs reprises par des événements violents qui se produisent environ tous les 100 millions d'années.

Il y a sept ans, l'étude des lignes d'absorption a révélé l'existence, dans le milieu intergalactique, de traces d'éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium. Le premier élément détecté fut le carbone ionisé, dont la raie double caractéristique se répétait, sur certains spectres, à côté de chaque raie Lyman-alpha. Depuis, on a également décelé la présence de magnésium et d'oxygène. Le plus souvent, au sein des galaxies ces atomes se regroupent en molécules gigantesques plus connues sous le nom de... grains de poussière. Ces grains trahissent leur présence en rougissant la lumière qui traverse le milieu interstellaire, de même que les particules en suspension dans l'atmosphère engendrent les couleurs du coucher de Soleil. Ce rougissement n'a pas lieu au sein des nuages de gaz intergalactiques, ce qui indique que les éléments lourds s'y trouvent sous la forme d'atomes isolés avec une densité d'environ un atome lourd pour un million d'atomes d'hydrogène. C'est une bien faible quantité, mais cela suffit à nous convaincre que le milieu intergalactique n'est pas un simple reliquat passif du matériau qui a formé les galaxies : ces éléments lourds, si peu nombreux qu'ils soient, ne sont produits que dans le cœur des étoiles et ont, d'une façon ou d'une autre, été éjectés loin des galaxies. Les spectres d'absorption des quasars nous montrent des nuages de gaz ténus et situés à des distances énormes de la Voie lactée, c'est-à-dire tels qu'ils étaient à des époques très reculées de l'histoire cosmique.

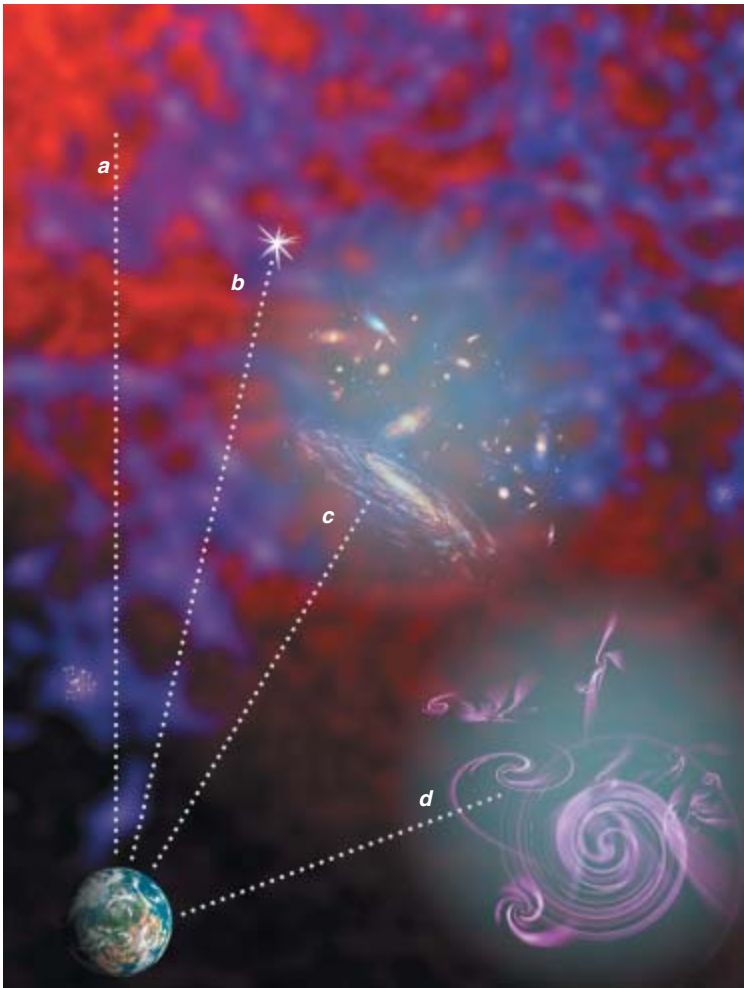
La température des amas

La troisième méthode d'observation dont nous disposons nous révèle un tout autre type d'objets : des poches de gaz denses et massives situées dans l'Univers proche et, par conséquent, contemporain. Ce gaz réside dans les plus grandes structures gravitationnellement liées qui existent dans l'Univers : les amas de galaxies. Le terme « amas de galaxies » est d'ailleurs plutôt malheureux : ces objets sont, pour l'essentiel, constitués de plasma chaud au sein duquel les galaxies sont éparpillées comme des pépins dans une pastèque. Ce gaz ionisé n'est autre qu'une forme un peu comprimée par la gravité du milieu intergalactique. Il est chauffé à plusieurs millions de kelvins et brille puissamment dans le domaine des rayons X. Les télescopes spatiaux sensibles aux rayons X, tels *Chandra* et *XMM-Newton*, ont grandement facilité l'étude de ce gaz.

L'ancien paradigme de la formation des structures prédisait que le gaz des amas devait être chauffé sous la seule action de la compression gravitationnelle. Dans ce

cadre, on calculait que sa température (que l'on déduit du spectre du rayonnement X émis par le gaz) était d'autant plus élevée que sa masse et sa densité étaient grandes. Comme masse et densité déterminent également la luminosité du gaz, on avait établi que cette luminosité devait être proportionnelle au carré de sa température. Or, ce n'est pas ce que montrent les observations : la luminosité du plasma chaud qui baigne les amas est proportionnelle à la température à la puissance 3,5. Encore une fois, ce résultat témoigne d'une activité inattendue dans le milieu intergalactique ; nous y reviendrons.

Pour finir, le quatrième et dernier moyen d'observation vise à déterminer l'une des propriétés les plus mal comprises du milieu intergalactique et, peut-être, la plus cruciale :



2. LE GAZ INTERGALACTIQUE est presque invisible et les astronomes ne peuvent pas l'étudier directement. Ils tirent leurs informations de quatre types d'observations. Le fond de rayonnement micro-onde offre un instantané du milieu intergalactique, tel qu'il était 300 000 ans après le Big Bang, lorsqu'il est passé de l'état de plasma chaud à celui de gaz neutre (a). Les spectres de quasars (b) constituent des carottes dans l'espace-temps qui révèlent les nuages de gaz traversés par la lumière avant de nous parvenir. On en déduit notamment la répartition spatiale du gaz. Les images prises dans le domaine des rayons X (c) montrent les nuages de gaz très chauds qui baignent les amas de galaxies proches, et, par conséquent, contemporains. Enfin, les mesures de champ magnétique (d) réalisées par les radiotélescopes ont révélé que le milieu intergalactique a un champ magnétique pour des raisons que l'on ne comprend pas encore parfaitement.

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.

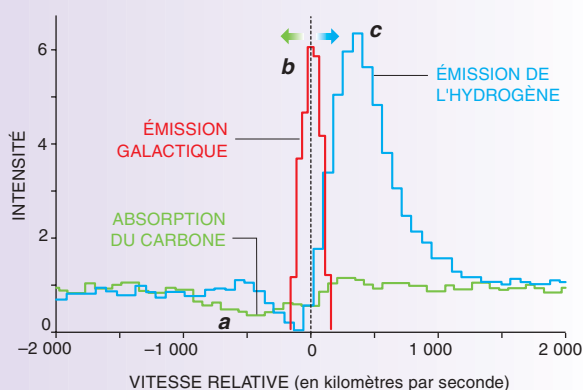
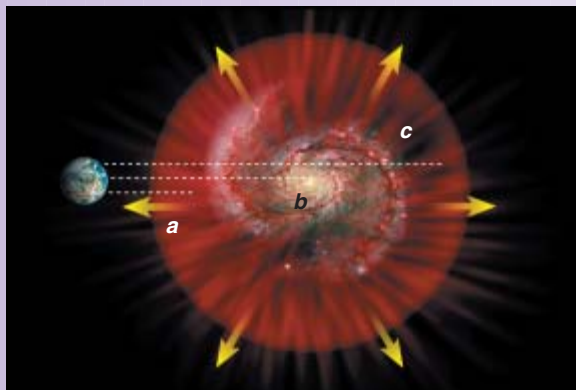
Quelles furent les contributions respectives à la réionisation des quasars, des étoiles primordiales supergéantes et des jeunes étoiles formées dans les premières galaxies ? Les astronomes n'ont pas encore pu le déterminer. Les meilleures mesures de la contribution des étoiles s'appuient sur l'observation des galaxies dites de la «coupe 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.

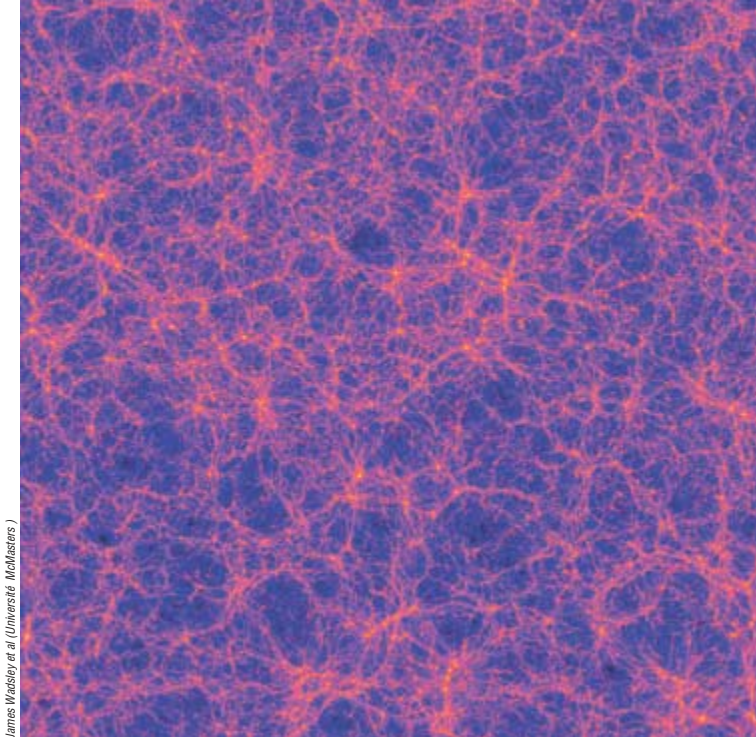
Une autre méthode consiste à examiner l'abondance et la répartition des éléments lourds. Si ces éléments sont détectés presque partout, alors la première génération d'étoiles était probablement constituée d'astres supermassifs uniformément répartis dans l'espace. Des quasars ou des galaxies naines auraient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

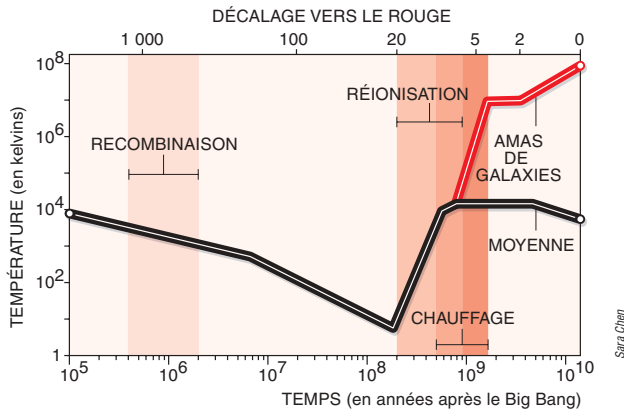


James Wadley et al (Université McMaster)

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 reionisation 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 reionisation. 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 reionisé l'Univers ont engendré assez de pression thermique pour ralentir la formation d'objets compacts leur ressemblant, ce qui a mis fin à la reionisation. 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.

