

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.

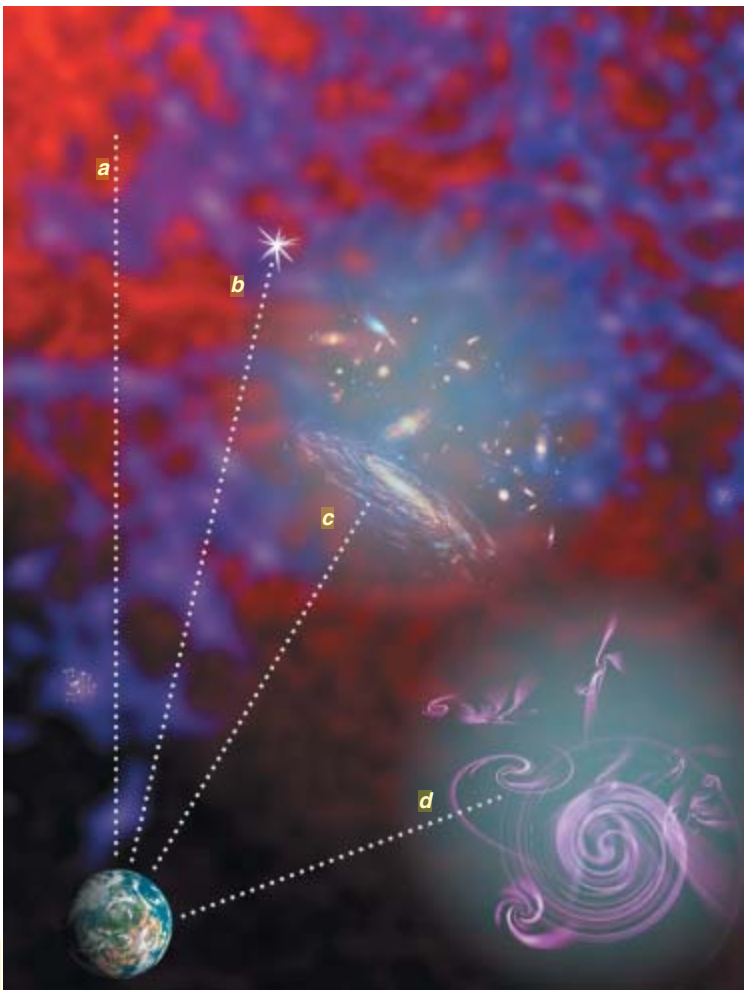
La température des amas

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 « 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.

