

L'AUTEUR



James GEACH, né en Angleterre, est astronome observateur. Il est actuellement chercheur postdoctoral à l'Université McGill de Montréal, au Canada.

✓ BIBLIOGRAPHIE

R. Davé *et al.*, *The intergalactic medium over the last 10 billion years - 1. Ly-alpha absorption and physical conditions*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 408, n° 4, pp. 2051-2070, novembre 2010.

J. E. Geach *et al.*, *The Chandra deep protocluster survey: Ly-alpha blobs are powered by heating, not cooling*, *Astrophysical Journal*, vol. 700, n° 1, pp. 1-9, juillet 2009. arxiv.org/abs/0904.0452

Galaxies : fenêtres sur l'Univers, *Dossier Pour la Science*, n° 56, juillet-septembre 2007.

W. Tucker *et al.*, *Le souffle des trous noirs*, *Pour la Science*, n° 354, avril 2007.

E. Scannapieco *et al.*, *Le milieu intergalactique*, *Pour la Science*, n° 301, novembre 2002.

Site de l'auteur : www.physics.mcgill.ca/~jimgeach

Une autre façon de présenter les choses est de dire que le processus de formation des galaxies est inefficace – un peu comme si un fermier semait tout un champ et que seule une graine sur dix levait. Les astronomes essaient depuis des années d'expliquer pourquoi. La réponse qui émerge nous oblige à revoir l'idée que nous nous faisons de la formation des galaxies, et, plus radicalement encore, à revoir la nature même de ce qu'est une galaxie.

Depuis des décennies, les observateurs reconstituent une chronologie de l'histoire cosmique décrivant le contenu de l'Univers à différentes étapes de son évolution. Ce faisant, il est progressivement apparu qu'il y avait plus de baryons à l'aube de l'Univers que nous n'en détectons directement aujourd'hui.

On a perdu la moitié de l'Univers !

La quantité initiale de matière baryonique est en fait assez simple à estimer. Cette information est contenue dans le rayonnement fossile du Big Bang, le fond diffus cosmologique. Des expériences de pointe, comme WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) ou l'observatoire spatial *Planck*, ont détecté de petites fluctuations de température de ce rayonnement. La distribution de ces fluctuations reflète la densité en baryons de l'Univers à une époque où les galaxies n'étaient pas encore formées.

La mesure des abondances en hélium, deutérium et lithium apporte une vérification indépendante. Ces éléments ont été synthétisés dans les premières minutes de l'Univers en proportions qui dépendaient de la quantité totale de matière baryonique. Les deux techniques indiquent que la masse totale de matière baryonique devrait représenter quatre pour cent du contenu total de l'Univers actuel (17 pour cent de la masse totale).

Initialement, tous les baryons étaient sous forme d'un gaz chaud qui remplissait l'espace. Dans les régions où la densité de matière initiale était élevée, le gaz s'est accumulé sous l'effet de la gravité en nuages de plus en plus denses, qui ont été le point de départ de la formation des galaxies. Les astronomes ont détecté ce réservoir de gaz dans l'Univers jeune en analysant la lumière provenant de lointains quasars brillants. Peu importe pour nous à ce stade la nature des quasars ; il suffit de les considérer comme des pha-

res extrêmement brillants, qui éclairent par derrière le gaz primordial flottant dans l'espace intergalactique. Quand un rayon lumineux issu d'un quasar traverse un nuage d'hydrogène neutre et froid, le gaz absorbe une partie des photons. Le nuage n'absorbe que les photons ayant une certaine énergie, et cela se traduit par une lacune dans le spectre du quasar à une longueur d'onde bien précise : c'est ce que les astronomes appellent une raie d'absorption.

Un rayon lumineux provenant du quasar peut traverser une centaine de nuages de ce genre lors de son trajet à travers l'Univers, et chacun peut imprimer une raie d'absorption à une longueur d'onde légèrement différente, qui dépend de la distance entre le nuage et l'observateur. En faisant la somme de ces raies d'absorption, on peut calculer quelle proportion de baryons était contenue dans ces nuages. Le résultat suggère que jusqu'à cinq milliards d'années après le Big Bang, soit il y a environ neuf milliards d'années, on pouvait retrouver la trace du stock initial de l'Univers en baryons. La plus grande part de la matière baryonique flottait dans l'espace intergalactique et ne s'était pas encore effondrée pour former des galaxies lumineuses.

Au cours des neuf milliards d'années écoulées depuis, la plupart des galaxies que nous voyons aujourd'hui se sont formées à partir de ce vaste réservoir d'hydrogène primordial. À l'intérieur des galaxies, les baryons ont pris diverses formes : étoiles, vestiges stellaires, gaz neutre (atomique ou moléculaire), gaz ionisé, poussière, planètes, êtres vivants.

On peut estimer la masse des baryons des différentes formes en mesurant leurs émissions sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Par exemple, la lumière visible et dans l'infrarouge proche révèle la masse des étoiles ; une raie d'émission radio particulière signale la quantité d'hydrogène atomique neutre ; la lumière infrarouge trahit la présence de poussière interstellaire.

Les astronomes ont recensé ainsi toutes les différentes phases de baryons dans toutes les galaxies observables, et c'est là qu'apparaît le désaccord : le total rend compte de seulement dix pour cent du stock initial de baryons présent dans l'Univers jeune. Difficile de croire qu'ils ont purement et simplement disparu : ils doivent traîner dans les vastes espaces intergalactiques. Mais pourquoi ne les voyons-nous pas ?

Les astronomes savent où trouver certains de ces baryons intergalactiques. Les amas, des essaims denses de galaxies, sont remplis de gaz ionisé diffus, ou plasma. Le champ gravitationnel intense de l'amas imprime aux ions une grande vitesse, conférant au plasma une température de plusieurs centaines de millions de degrés, suffisamment pour qu'il émette des rayons X. Des télescopes spatiaux tels que XMM-Newton et *Chandra* détectent de façon routinière des amas de galaxies au moyen de cette émission de rayons X.

Mais les amas sont rares, si bien que le gaz qu'ils contiennent ne rend compte que de quatre autres pour cent des baryons. Quand on additionne tous les baryons que nous voyons dans les galaxies, les amas et ailleurs dans l'espace intergalactique, cela ne représente toujours qu'une moitié du total environ, ce qui veut dire qu'il reste l'équivalent de 500 milliards de galaxies à trouver.

Pour équilibrer les comptes, Renyue Cen et Jeremiah Ostriker, de l'Université de Princeton, Romeel Davé de l'Université de l'Arizona, et leurs collaborateurs ont émis il y a une dizaine d'années l'hypothèse que les baryons sont présents, mais qu'ils ont évolué en une phase difficile à détecter. Les propriétés de ce composant insaisissable sont liées à la façon dont la matière cosmique de tous types, ordinaire comme exotique, s'organise en structures à grande échelle.

Les caprices du WHIM

Sous l'influence de la gravité, la matière noire s'est agencée en un vaste réseau de filaments qui s'enchevêtrent dans l'Univers. Les amas sont en fait les nœuds de grande densité de cette toile cosmique. En dehors des amas, la plupart des galaxies se rassemblent en groupes de plus faible densité ou s'alignent le long de filaments.

Le gaz intergalactique est attiré par la gravité vers les filaments, et les simulations suggèrent qu'en tombant, il est chauffé par des ondes de choc à des températures allant de 100 000 degrés à des dizaines de millions de degrés. Cela peut paraître brûlant, mais c'est tiède par rapport au gaz des amas. C'est suffisamment chaud pour qu'il reste ionisé, mais trop froid pour qu'il émette des rayons X.

R. Cen, J. Ostriker et R. Davé ont surnommé ce matériau WHIM (pour *warm-hot intergalactic medium*, ou milieu intergalactique chaud à très chaud – et *whim* signifie caprice). Si l'on arrivait à confirmer sa présence et son étendue, on parviendrait peut-être à mettre le doigt sur l'emplacement et l'état des baryons manquants.

La façon la plus prometteuse de détecter le WHIM est de rechercher des constituants à l'état de traces tels que l'oxygène ou l'azote ionisés, qui absorbent la lumière ultraviolette ou les rayons X à

