

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.

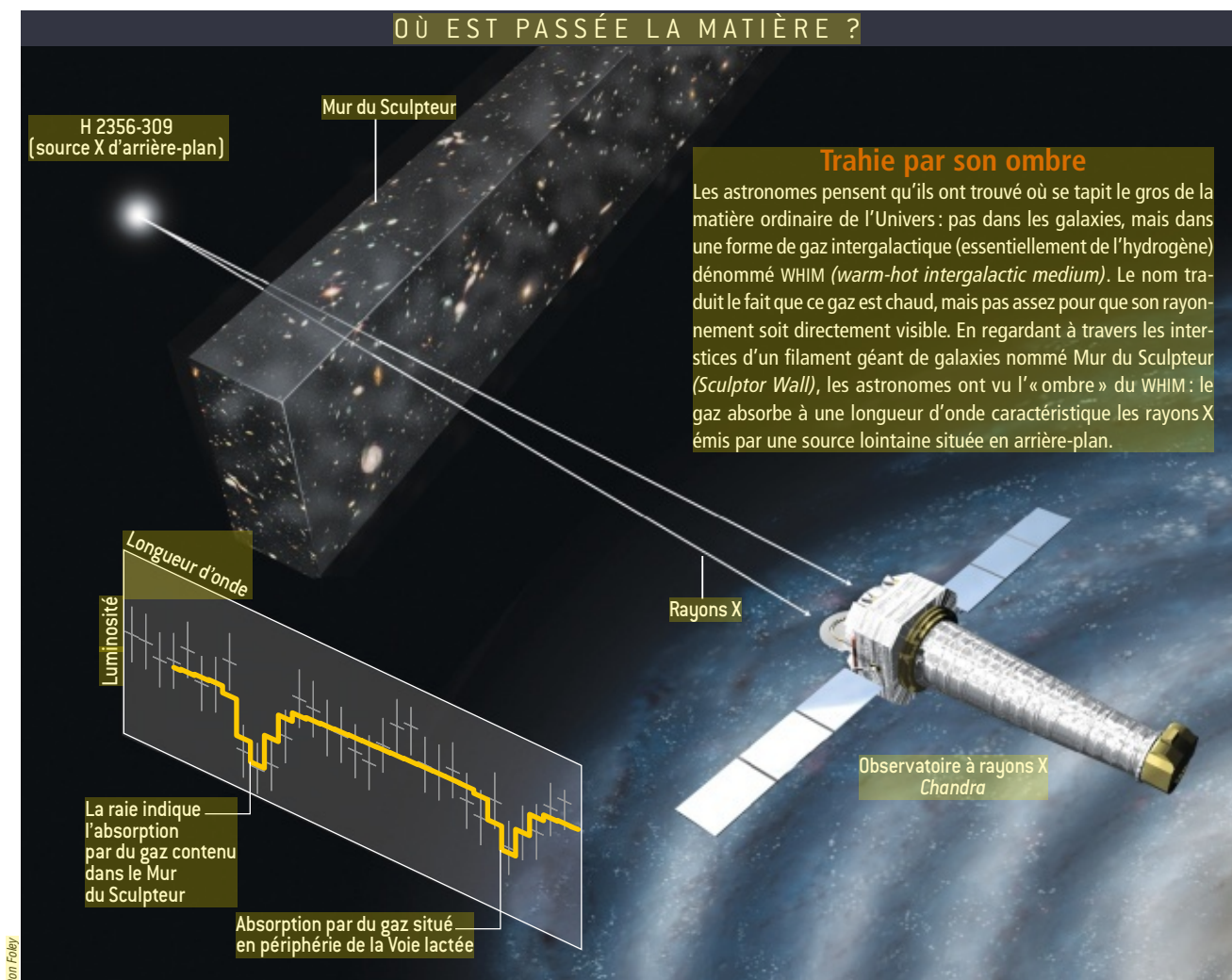
Les caprices du WHIM

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



des longueurs d'onde particulières. En fait, les astronomes peuvent appliquer la même technique des raies d'absorption que celle utilisée pour le recensement des nuages d'hydrogène froid dans l'Univers jeune; en d'autres termes, on peut rechercher les raies d'absorption dans le spectre des quasars qui rétroéclairent le WHIM.

Nous avons déjà pu en entrapercevoir de très prometteuses. Dans l'ultraviolet, le télescope spatial *Hubble* et l'instrument FUSE (*Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*, dont la mission est achevée) ont détecté une absorption par de l'oxygène fortement ionisé. Les premiers indices nous sont parvenus il y a un peu plus de dix ans, alors que le concept de WHIM était tout nouveau. Todd Tripp, maintenant à l'Université du Massachusetts à Amherst, et Blair Savage, de l'Université du Wisconsin à Madison, ont détecté une absorption par de l'oxygène ionisé dans le spectre du quasar PG 0953+415, dans l'ultraviolet lointain.

D'avantage d'observations ont suivi dans la dernière décennie, rendues possibles par les améliorations des instruments, la plus récente étant l'installation du *Cosmic Origins Spectrograph* sur *Hubble*. Bien que les systèmes contenant de l'oxygène fortement ionisé semblent très répandus, cet ion ne signe que la partie relativement froide du WHIM. Pour traquer le gaz chaud, plus abondant, il faut rechercher une absorption par des espèces encore plus fortement ionisées.

Taotao Fang, de l'Université de Californie à Irvine, et ses collaborateurs ont utilisé les télescopes à rayons X *Chandra* et *XMM-Newton* pour jeter un coup d'œil dans les interstices du Mur du Sculpteur (*Sculptor Wall*, en anglais), une vaste chaîne de galaxies située dans l'Univers local: un parfait terrain de chasse au WHIM. Ils ont trouvé une absorption par de l'oxygène ionisé au point d'avoir perdu presque tous ses électrons. L'équipe a estimé que la densité globale des baryons dans cette composante du WHIM est en accord avec les simulations cosmologiques.

Bien qu'encourageantes, ces observations ne font que gratter la surface. Les

observations sont difficiles: le signal WHIM est faible, et nous travaillons en général aux limites techniques des instruments. Même quand nous détectons une absorption, nous devons faire de nombreuses hypothèses sur la composition du gaz pour appréhender les propriétés plus générales du WHIM. Plus important, la technique des raies d'absorption repose sur des quasars dont la présence à tel ou tel endroit est fortuite. Les quasars sont rares, les quasars brillants encore plus, ce qui fait de la chasse au WHIM une sorte de loterie. Néan-

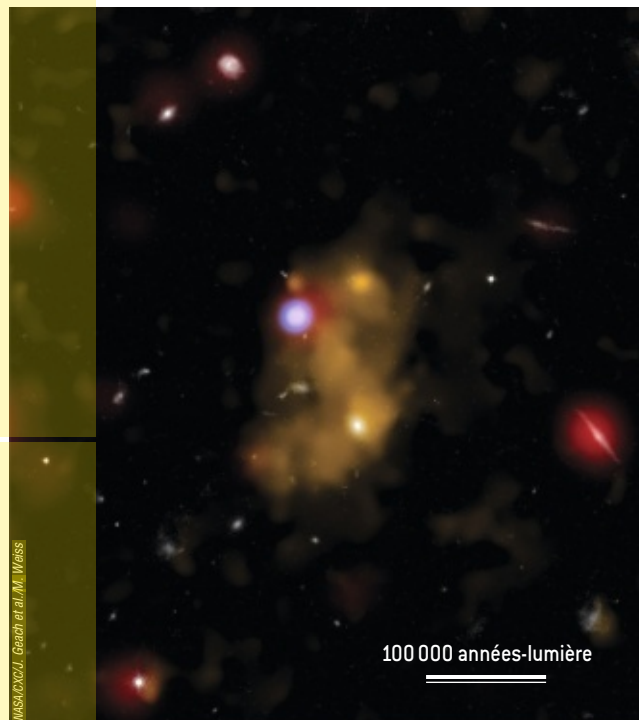
Un autre point est clair: la formation de galaxies était autrefois beaucoup plus efficace. Il y a environ huit milliards d'années, le taux de naissance des étoiles était 10 à 20 fois plus élevé qu'aujourd'hui. La plupart des galaxies que nous voyons aujourd'hui se sont formées à cette époque. Afin d'expliquer pourquoi la formation de galaxies s'est à tel point ralentie, les astronomes ont dû repenser nos modèles fondamentaux de la naissance des galaxies.

En principe, la recette pour faire une galaxie est très simple. Selon un modèle introduit dans les années 1990 par Simon White, de l'Institut Max Planck d'astrophysique de Garching, en Allemagne, et Carlos Frenk, de l'Université de Durham en Angleterre, les galaxies croissent au sein de grumeaux massifs de matière noire, nommés halos, dont l'attraction gravitationnelle aspire le gaz environnant comme de l'eau s'engouffrant dans une bonde.

Dans ce modèle, une partie du gaz est chauffée par des ondes de choc en traversant le halo, puis se refroidit par rayonnement, ce qui lui permet de s'agglomérer en un corps cohésif. Une fois dans la galaxie, le gaz peut continuer à se refroidir et s'effondrer en nuages d'hydrogène moléculaire. Sous l'effet de la contraction gravitationnelle, ces nuages finissent éventuellement par atteindre la densité

nécessaire pour former des étoiles. Des galaxies plus grosses peuvent se former par fusion de petites galaxies.

S. White et C. Frenk étaient bien conscients que leur modèle n'était pas complet. Par exemple, tout le gaz qui pénètre dans les galaxies n'était pas chauffé par les ondes de choc jusqu'à atteindre de hautes températures. Mais le scénario de l'accrétion de gaz au sein des halos de matière noire donnait aux astronomes un cadre solide pour comprendre les principes de formation des galaxies. Ce domaine a été florissant ces 20 dernières années. Les théoriciens ont exploré plus avant la physique des écoulements de gaz et affiné le modèle initial. Des simulations numériques récentes, à haute résolution, de l'évolution thermodynamique du gaz suggèrent



2. CETTE MASSE INFORME d'hydrogène gazeux (en jaune) semble être le rebut de la formation d'une galaxie massive.

moins, nous pensons savoir où se trouvent les baryons manquants, et comment les détecter. De nombreux astronomes travaillent actuellement à cartographier sérieusement le WHIM.

Bataille pour des baryons

L'existence du WHIM explique en partie pourquoi la formation des galaxies est si inefficace. L'apparition d'une structure à grande échelle a rendu le gaz intergalactique trop ténu et chaud pour s'accumuler et constituer les réservoirs froids et denses nécessaires à la formation de galaxies. Mais à l'évidence, certains baryons ont réussi à former des galaxies, sinon nous ne serions pas là.