

Nouvelles du ciel X†

Un superamas découvert par eRosita

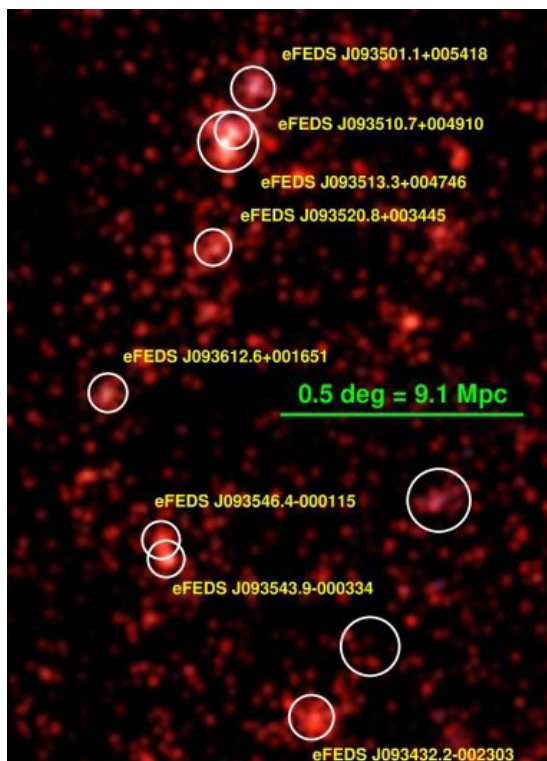
Le survey eFEDS (Final Equatorial Depth Survey) du télescope spatial eROSITA à bord de l'observatoire SRG (Spektrum-Roentgen-Gamma – cf. *Le Ciel*, octobre 2020, p. 472) a conduit à la découverte d'un nouveau superamas composé de huit amas de galaxies. Les superamas comptent parmi les plus grandes structures de l'Univers. Ils renferment des structures de masses diverses, depuis des amas massifs de galaxies jusqu'aux filaments et ponts de matière de faible densité. Leur étude est essentielle pour comprendre la formation et l'évolution des grands filaments de la toile cosmique.

Le superamas est caractérisé par un décalage vers le rouge de 0,36. Les observations indiquent une collision triple entre les amas les plus au nord, avec une fusion double et une « pré-fusion ».

L'amas le plus lumineux des huit, eFEDS J093513.3+004746, situé dans la partie nord du superamas, est aussi le plus massif avec une masse estimée à 580 billions (mille milliards) de masses solaires. Les amas les moins massifs de ce superamas, eFEDS J093546.4-000115 et eFEDS J093543.9-000334, ont des masses d'environ 130 billions de masses solaires, et les autres ont entre 140 et 250 billions de masses solaires.

En outre, les données ont révélé l'existence de deux « reliques » radio dans la région nord

▼ Carte de densité du nouveau superamas découvert à un redshift de 0,36. L'image provient de la caméra HSC (Hyper Suprime-Cam) d'eROSITA. Les cercles marquent les huit galaxies, les deux reliques radio et le halo radio qui les relie. (Ghirardini et al., 2020)



† Basé sur des communiqués Univ. Tübingen, Univ. Bonn, CNRS

et sud-est des amas les plus septentrionaux. Les reliques sont des sources radio synchrotron diffuses que l'on trouve dans les régions périphériques des amas de galaxies. Comme les halos radio, ils n'ont pas d'équivalent évident dans les galaxies, mais leurs formes sont beaucoup plus allongées et irrégulières que celles des halos radio. Un halo radio allongé reliant deux reliques radio dans les eFEDS J093513.3+004746 et eFEDS J093510.7+004910 a également été découvert, ce qui indique que l'amas est en train de subir un événement majeur de fusion, ce que confirme la cartographie de la densité des galaxies montrant deux pics dans les régions nord et sud du superamas.

Les propriétés des rayons X des huit amas formant le superamas, ainsi que leurs propriétés morphologiques, sont semblables à celles des quelque 300 amas du survey eFEDS.

Les bulles eROSITA

De gigantesques structures de gaz chaud situées de part et d'autre du disque galactique sont probablement dues aux ondes de choc générées par l'activité passée du centre de la Voie lactée.

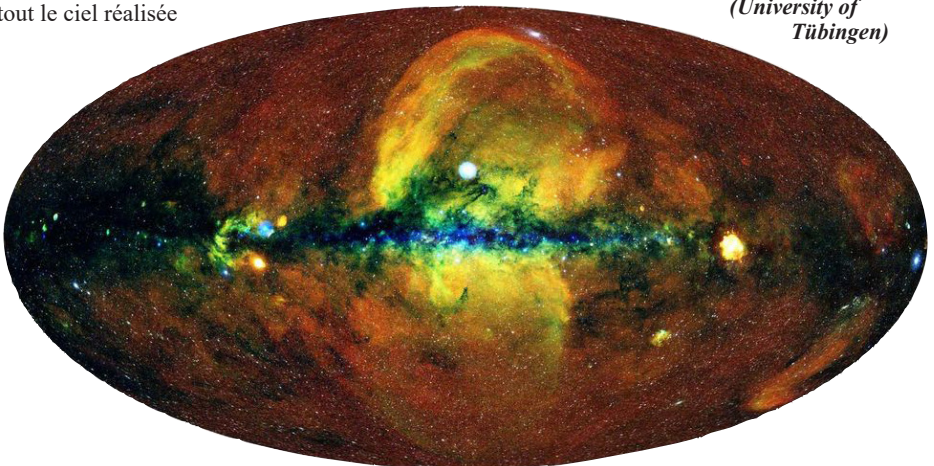
Le télescope X eROSITA balaye l'ensemble du ciel tous les six mois et les données permettent aux scientifiques de rechercher des structures qui en couvrent une partie importante. La première étude de tout le ciel réalisée

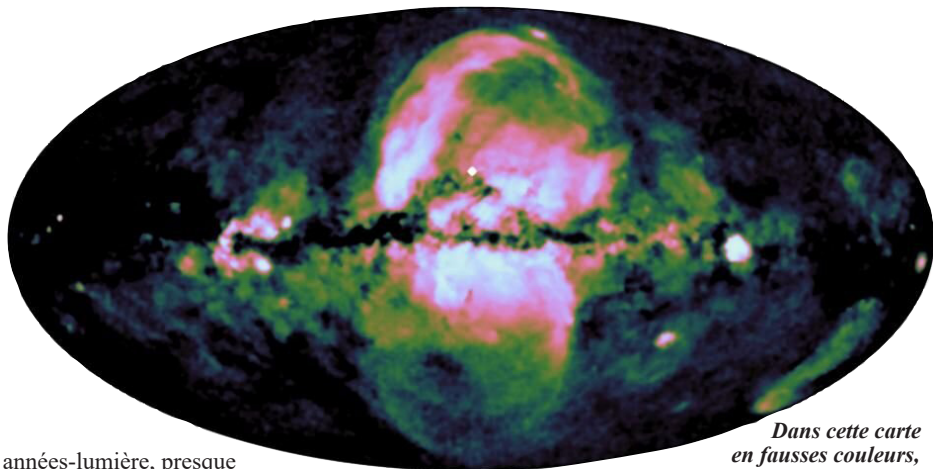
par eROSITA a révélé une gigantesque structure en forme de sablier dont les deux parties ressemblent étonnamment aux bulles de Fermi, détectées il y a une décennie à de plus hautes énergies. L'explication la plus probable de ces caractéristiques est une ancienne injection massive d'énergie en provenance du centre galactique, entraînant des chocs dans l'enveloppe de gaz chaud de notre galaxie.

La première carte du ciel produite par eROSITA avait révélé une structure circulaire de gaz chaud sous le plan de la Voie lactée occupant la majeure partie du ciel méridional. Une structure similaire dans le ciel du nord, l'« éperon polaire nord », était connue depuis longtemps et on pensait qu'elle était la trace d'une ancienne explosion de supernova. Prises ensemble, ces deux structures forment plutôt un sablier centré sur le centre galactique.

L'émission de rayons X à grande échelle observée par eROSITA dans sa bande d'énergie moyenne (0,6-1,0 keV) montre que la taille intrinsèque des bulles pourrait atteindre 50 000

La carte du ciel de la SSR/eROSITA sous forme d'image en fausses couleurs (rouge pour les énergies 0,3-0,6 keV, vert pour 0,6-1,0 keV, bleu pour 1,0-2,3 keV). L'image originale, avec une résolution d'environ 12 secondes d'arc, a été lissée. (University of Tübingen)





années-lumière, presque autant que la Voie lactée dans son ensemble.

Les frontières nettes de ces bulles sont très probablement les traces de chocs causés par l'injection massive d'énergie de la partie intérieure de notre galaxie dans le halo galactique. Une telle explication avait déjà été suggérée pour les bulles de Fermi.

Cette découverte aidera les astronomes à comprendre le cycle cosmique de la matière dans et autour de la Voie lactée et d'autres galaxies. La majeure partie de la matière ordinaire de l'Univers est invisible à nos yeux, toutes les étoiles et galaxies que nous observons avec des télescopes optiques représentent moins de 10 % de sa masse totale. De grandes quantités de matière non observée devraient résider dans des halos ténus enroulés comme des cocons autour des galaxies et des filaments entre elles dans le réseau cosmique. Ces halos sont chauds, avec une température de plusieurs millions de degrés, et donc visibles uniquement avec des télescopes sensibles aux rayonnements de haute énergie.

Les bulles que l'on voit maintenant avec eROSITA trahissent des perturbations dans cette enveloppe de gaz chaud entourant la Voie lactée, perturbations dues à un sursaut d'activité de formation stellaire, soit une manifestation violente du trou noir supermassif au centre de la Galaxie. Bien qu'il soit actuellement en sommeil, le trou noir pourrait bien avoir

Dans cette carte en fausses couleurs, l'émission étendue, d'énergie allant de 0,6 à 1,0 keV, est mise en évidence. La contribution des sources ponctuelles a été supprimée et l'échelle ajustée pour améliorer la visibilité des grandes structures.
(University of Tübingen)

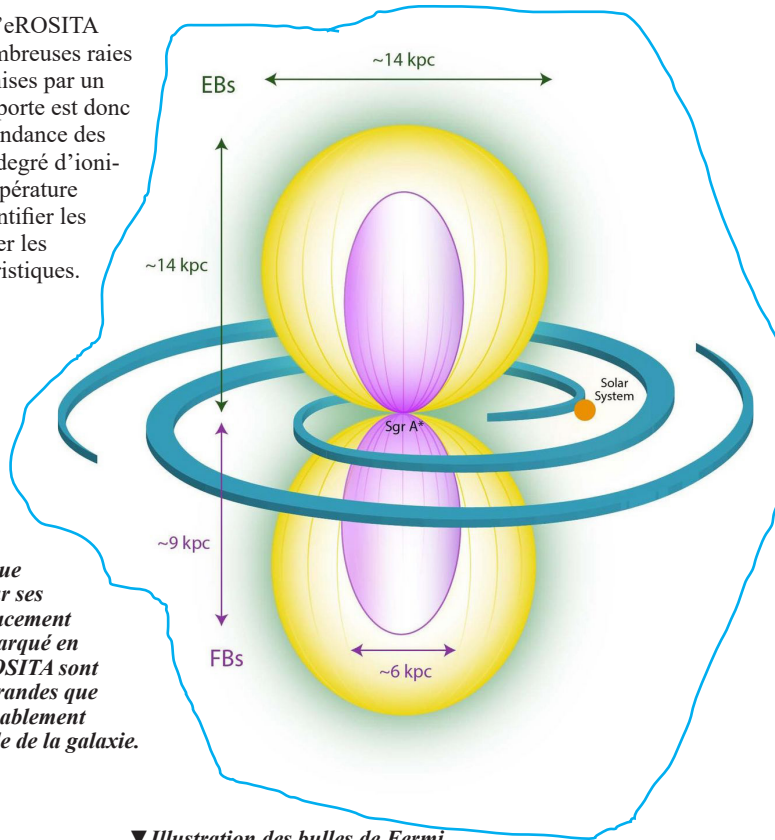
été actif dans le passé, à l'instar des noyaux galactiques actifs (AGN) contenant des trous noirs à croissance rapide que l'on observe dans des galaxies lointaines. Dans les deux cas, l'énergie nécessaire pour alimenter la formation de ces énormes bulles devait être énorme, de l'ordre de 10^{49} joules, ce qui équivaut à la libération d'énergie de 100 000 supernovæ ou d'un AGN.

Les cicatrices laissées par de tels éclats mettent très longtemps à guérir dans ces halos. Les scientifiques ont cherché les traces d'une telle activité violente autour de nombreuses galaxies. Les bulles d'eROSITA fournissent maintenant un support solide pour comprendre les interactions entre le noyau de la galaxie et le halo, qui sont suffisamment énergétiques pour perturber la structure, ainsi que le contenu énergétique et l'enrichissement chimique du milieu circumgalactique.

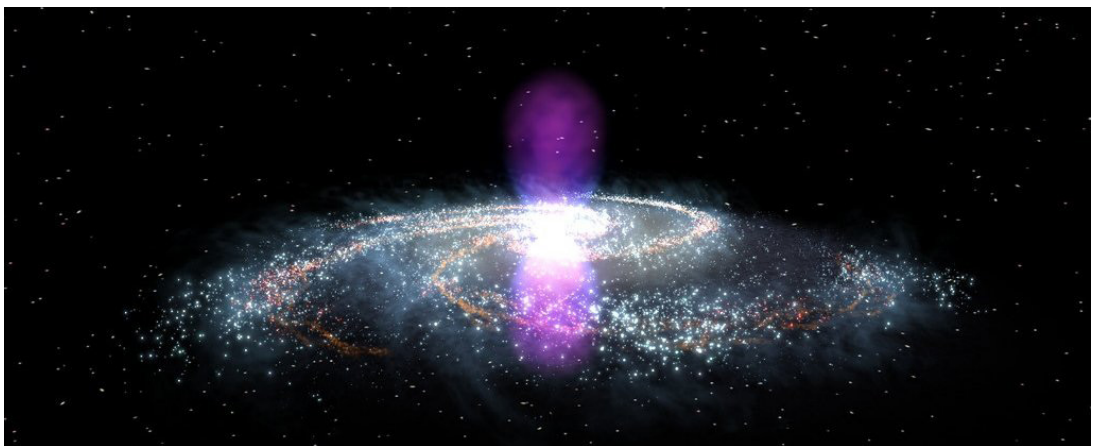
eROSITA a maintenant achevé le deuxième balayage du ciel entier, doublant le nombre de photons de rayons X provenant des bulles. Il y a beaucoup de travail en pers-

pective, car les données d'eROSITA permettent d'isoler de nombreuses raies spectrales de rayons X émises par un gaz hautement ionisé. La porte est donc ouverte pour étudier l'abondance des éléments chimiques, leur degré d'ionisation, la densité et la température du gaz, ainsi que pour identifier les ondes de choc et en estimer les échelles de temps caractéristiques.

► *Vue schématique des bulles eROSITA (jaune) et Fermi (violet). Le disque galactique est indiqué par ses bras en spirale et l'emplacement du Système solaire est marqué en orange. Les bulles d'eROSITA sont considérablement plus grandes que les bulles de Fermi, probablement comparables à l'ensemble de la galaxie. (University of Tübingen)*



▼ *Illustration des bulles de Fermi. (NASA/GSFC)*



La matière cachée démasquée

Les astrophysiciens estiment que près de 40% de la matière ordinaire, baryonique, qui constitue les étoiles, planètes et galaxies demeure inobservée. Les baryons sont des particules formées de trois quarks, comme les protons et les neutrons. Ils composent les atomes et les molécules et toutes les structures visibles dans l'univers observable (étoiles, galaxies, amas de galaxies, etc.). Cette matière baryonique ne comprend pas que des baryons, puisque des particules comme les électrons et les neutrinos sont des leptons, mais les astronomes ont adopté cette terminologie.

Cette matière manquante, inobservée jusqu'à maintenant, doit être distinguée de la matière noire, composée de matière non baryonique, de nature inconnue. Des scientifiques auraient pour la première fois mis en évidence la matière baryonique cachée grâce à une étude statistique innovante de données âgées de 20 ans.

Les galaxies se distribuent dans l'Univers sous la forme d'un réseau complexe de nœuds connectés entre eux par des filaments, eux-mêmes espacés par des vides – la toile cosmique. Ses filaments renfermeraient la quasi-totalité de la matière baryonique, sous la forme d'un gaz diffus et chaud. Mais le faible signal provenant de cette phase clairsemée de gaz fait qu'en pratique, 40 à 50% des baryons manquent à l'appel.

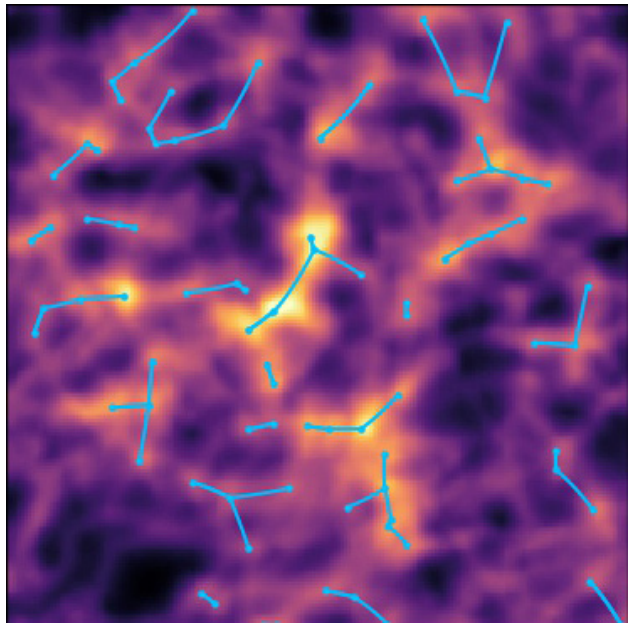
Image simulée de l'émission dans le domaine des rayons X du gaz contenu dans les filaments de la toile cosmique.

(Tanimura, H., Aghanim, N. /NRS/ Univ. Paris-Saclay)

ROSAT

Une analyse statistique a révélé pour la première fois l'émission, dans le domaine des rayons X, de baryons chauds peuplant les filaments. Ce résultat se fonde sur l'empilement de données provenant d'un prédécesseur de eROSITA, le télescope spatial X ROSAT, et relatives à environ 15 000 filaments cosmiques de grande taille, identifiés dans le relevé de galaxies SDSS (Sloan Digital Sky Survey). L'équipe a ainsi tiré parti de la coïncidence spatiale entre la position des filaments et l'émission X qui y est associée pour apporter des preuves tangibles de la présence du gaz chaud dans la toile cosmique et en mesurer pour la première fois la température.

Ce résultat conforte de précédentes analyses, fondées sur des détections indirectes du gaz chaud dans la toile cosmique via son effet sur le rayonnement fossile. Il ouvre la voie à des études plus détaillées permettant, grâce à des données de meilleure qualité, de tester l'évolution du gaz dans la structure filamenteuse de la toile cosmique.



Abell 3391/95

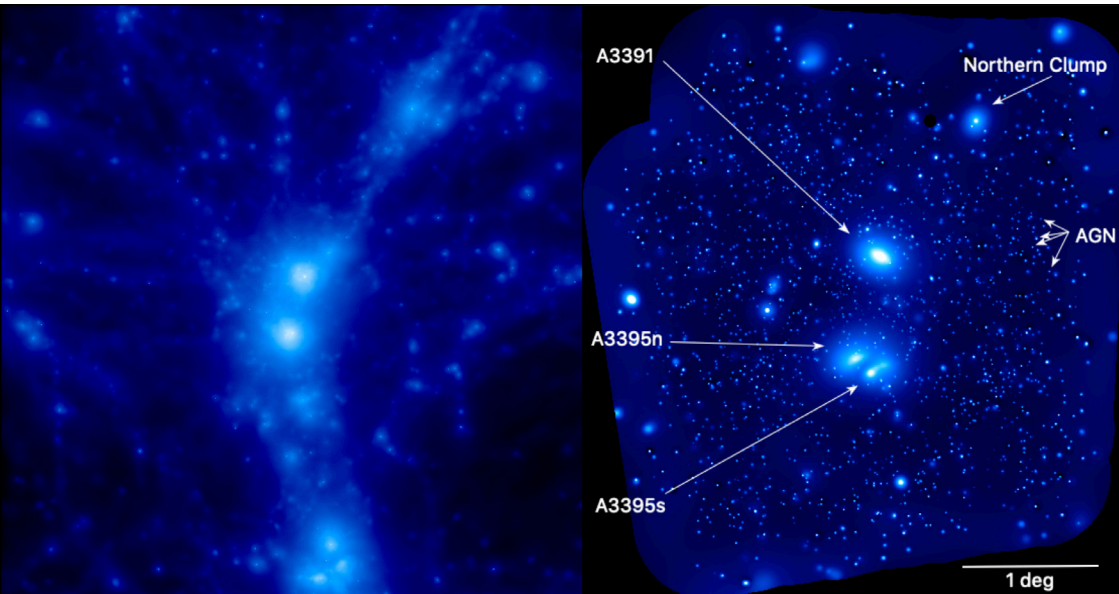
L'étude de ROSAT montre que les astronomes ont une idée assez précise de l'endroit où pourrait se trouver la matière cachée : dans les filaments de gaz chaud qui entourent et relient les galaxies et les amas de galaxies. Une équipe a maintenant observé pour la première fois un filament de gaz d'une longueur de 50 millions d'années-lumière. Sa structure est étonnamment similaire aux prédictions des simulations informatiques. Cette observation confirme donc également nos idées sur l'origine et l'évolution de l'Univers.

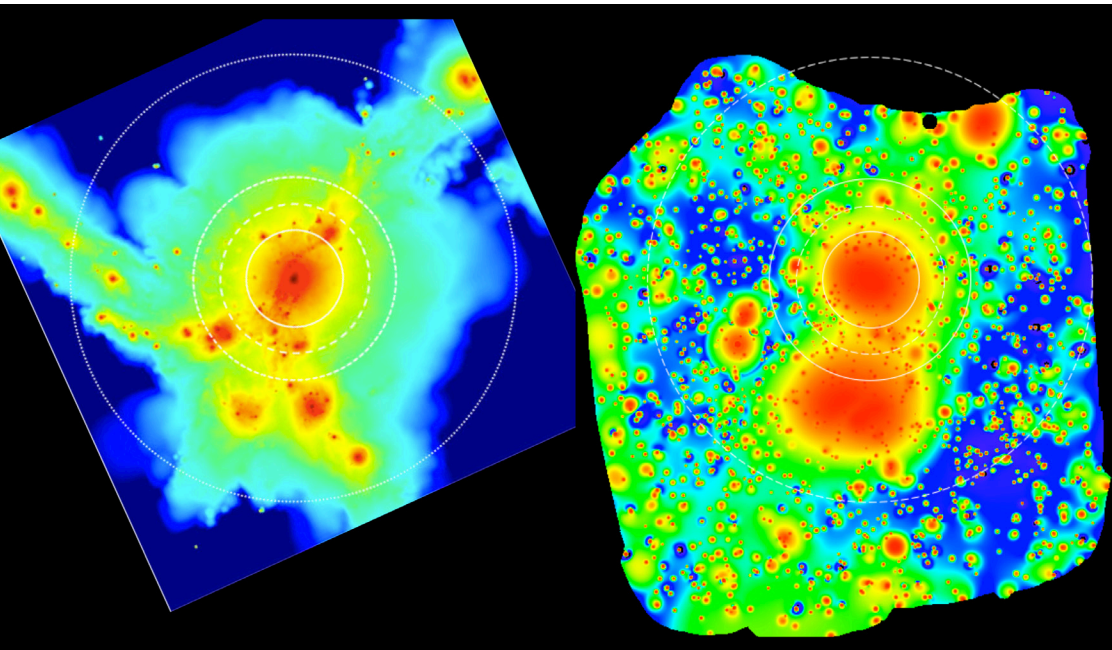
Nous devons notre existence à une minuscule aberration. Le Big Bang s'est produit il y a 13,8 milliards d'années et s'est développé à une vitesse fulgurante en un gigantesque nuage de gaz dans lequel la matière était presque uniformément répartie. Presque, mais pas complètement. Dans certaines parties, le nuage était un peu plus dense que dans d'autres. C'est pour cette raison qu'il existe des planètes, des étoiles et des galaxies. En effet, les zones les plus denses exerçaient des forces gravitationnelles légèrement plus élevées, qui attiraient vers elles le gaz

environnant. La matière s'est concentrée dans ces régions et l'espace qui les séparait s'est progressivement vidé. En 13 milliards d'années, une sorte de structure en éponge s'est développée : de grands trous sans matière, avec des zones intermédiaires où des milliers de galaxies sont rassemblées en amas.

Si tout s'est bien déroulé selon ce scénario, les galaxies et les amas devraient encore être reliés par des restes de ce gaz, comme les fils ténus d'une toile d'araignée. Selon les calculs, plus de la moitié de toute la matière baryonique de l'Univers est contenue dans ces filaments. C'est la forme de matière dont sont composées les étoiles et les planètes, comme nous le sommes nous-mêmes. Pourtant, elle a jusqu'à présent échappé à tous les regards. En raison de l'énorme expansion des filaments,

À gauche, un instantané extrait d'une simulation montre la distribution du gaz chaud dans Abell 3391/95. À droite, une image X par eRosita. (Reiprich et al., Astronomy & Astrophysics)





la matière qu'ils contiennent est extrêmement diluée : elle ne contient que dix particules par mètre cube, ce qui est bien moins que le meilleur vide que l'on peut créer sur Terre.

Grâce au télescope spatial X eROSITA, le gaz est visible pour la première fois. eROSITA possède des détecteurs très sensibles pour le type de rayonnement X qui émane du gaz dans les filaments. Le télescope a également un grand champ de vision. Comme un objectif grand angle, il capture une partie relativement importante du ciel en une seule mesure, et à une très haute résolution. Cela permet de prendre des images détaillées d'objets aussi énormes que des filaments en un temps relativement court.

Dans leur étude, les chercheurs ont examiné Abell 3391/95, un système composé de trois amas de galaxies et qui se trouve à environ 700 millions d'années-lumière de nous. Les images d'eROSITA montrent non seulement les amas et les nombreuses galaxies individuelles, mais aussi les filaments de gaz

Dans cette autre comparaison entre simulation et image X, les régions de faible densité ont été rendues plus apparentes.

(Reiprich et al., Space Science Reviews, 177, 195; Reiprich et al., Astronomy & Astrophysics)

reliant ces structures. Un des filaments peut se voir sur une longueur de 50 millions d'années-lumière, mais il est peut-être encore plus long, les scientifiques soupçonnent que les images n'en montrent qu'une partie.

Les astronomes ont comparé les observations avec les résultats d'une simulation qui reconstitue l'évolution de l'Univers. Les images d'eROSITA ressemblent étonnamment aux graphiques générés par ordinateur. Cela suggère que le modèle standard largement accepté pour l'évolution de l'Univers est correct. Plus important encore, les données montrent que la matière manquante est probablement cachée dans les filaments.

Image optique du système Abell 3391/95 obtenue avec la caméra DECam. On y a superposé une image X prise par eROSITA (le noir correspond à la plus forte densité de gaz) et des contours radio (en jaune) basés sur les données ASKAP. (Reiprich et al., Astronomy & Astrophys)

