

## Le sondage XXL de l'Univers

**La quête des paramètres cosmologiques décrivant notre Univers, tels que sa densité en matière noire et en énergie sombre, motive fortement la communauté astronomique depuis plus d'une décennie marquée par les résultats extraordinaires des satellites cosmologiques WMAP et Planck. L'un des moyens pour parvenir à des progrès dans ce domaine est de réaliser de très grands relevés dans plusieurs domaines de longueur d'onde.**

Depuis maintenant deux décennies, les satellites Chandra et XMM-Newton (XMM pour X-ray Multi-Mirror) ont fourni des données dans le domaine X concernant les galaxies actives (c'est à dire contenant un trou noir massif en train d'accréter de la matière), les amas de galaxies, et le fond du ciel en rayons X. XMM-Newton est un satellite destiné à l'observation des « rayons X mous » (0,1 à 12 keV), développé par l'Agence spatiale européenne (ESA). À l'époque de son lancement, il avait une sensibilité spectroscopique et un champ d'observation exceptionnels. Lancé en 1999, il était initialement prévu pour une durée de deux ans, mais il a si bien rempli sa mission qu'il a été prolongé plusieurs fois, et que sa fin est prévue maintenant pour le 31 décembre 2016.

Un consortium européen mené par une chercheuse du CEA, dans lequel figurent plusieurs laboratoires français, s'est constitué au début des années 2000 pour réaliser avec plusieurs instruments comme le télescope Canada-France-Hawaii et les télescopes de l'ESO (European Southern Observatory), un grand relevé multi-longueurs d'onde des sources observées par XMM-Newton sur de larges plages de ciel. Appelé XMM-LSS pour « XMM-Large Scale Structure » les résultats portant sur une surface de 5 degrés carré du ciel ont été publiés durant ces dernières années dans une vingtaine d'articles.

La coopération publie maintenant un ensemble de 14 articles, dont 13 sont sous presse dans la revue "Astronomy and Astrophysics", et le quatorzième dans "Publications of the Astronomical Society of Pacific". Ils exposent les premiers résultats obtenus à la suite de ce relevé, appelé maintenant XXL et étendu entre 2011 et 2013 à deux régions du ciel de 25 degrés carrés chacune. Le premier article, XXL1 (arXiv:1512.04317v1, Pierre, Pacaud, Adami et al.), en décrit les objectifs. XXL13 donne le contenu de matière baryonique des amas de galaxies (c'est à dire de matière "normale" n'incluant pas la "matière noire") (arXiv:1512.03814v, Eckert, Ettori, Coupon et al.) et XXL14 la densité de l'Univers déduite de l'étude de la région Sud (arXiv:1512.04662v, Lidman, Ardila, Owers et al.).

Le sondage a permis en effet de localiser et d'identifier 450 amas de galaxies. C'est en quelque sorte une carte en trois dimensions qui a été obtenue jusqu'à une distance de sept milliards d'années-lumière, en tenant compte des biais comme les amplifications gravitationnelles que subit la lumière pendant son trajet jusqu'à nous. Les amas sont les plus grandes structures de l'Univers, pouvant atteindre des masses de plus de cent mille milliards de fois celle du Soleil. On pense généralement qu'ils retiennent dans leur gaz et leurs étoiles toute la matière qu'ils ont capturée depuis l'époque de leur formation. Leur contenu en matière doit donc être représentatif de la fraction universelle de matière baryonique. À l'aide du relevé, les chercheurs pourront par conséquent reconstituer l'évolution et la répartition spatiale des grandes structures au cours du temps et tester différents scénarios cosmologiques.

Les premiers résultats révèlent une densité d'amas et une quantité de gaz dans ces amas un peu moins élevées que celle prévue par les modèles cosmologiques. Un déficit semblable avait été observé pour les amas plus massifs détectés par le satellite Planck sur tout le ciel. Cela suggère que certains paramètres décrivant la physique des amas doivent être revus, tels que la relation entre la masse des galaxies par rapport à celle de la matière noire contenue dans leurs halos (on appelle ce paramètre le « biais de masse »). Ce biais résulte de la façon dont les galaxies se forment dans les grandes structures. Il est également possible que le modèle cosmologique soit plus complexe que ce que l'on pense actuellement. L'étude de l'échantillon complet des 450 amas du projet XXL, qui sera publiée d'ici deux ans, devrait permettre de préciser cette conclusion.

Les premières analyses d'XXL révèlent aussi la découverte de cinq nouveaux « superamas » ou « amas d'amas » de galaxies : par exemple, le super-amas XLSSC-e, dans la constellation de la Baleine, à une distance d'environ 4,5 milliards d'années-lumière, est constitué de six amas différents couvrant une région du ciel de 0,3 degré par 0,2 degré, ce qui, à cette distance, correspond à des dimensions de 7 x 4,5 millions d'années-lumière.

On attend maintenant la suite des conclusions du XXL, qui préfigure les autres relevés encore plus vastes qui seront réalisés dans le futur, comme la mission spatiale Euclid ou le Large Synoptic Survey Telescope, dont nous avons déjà parlé.

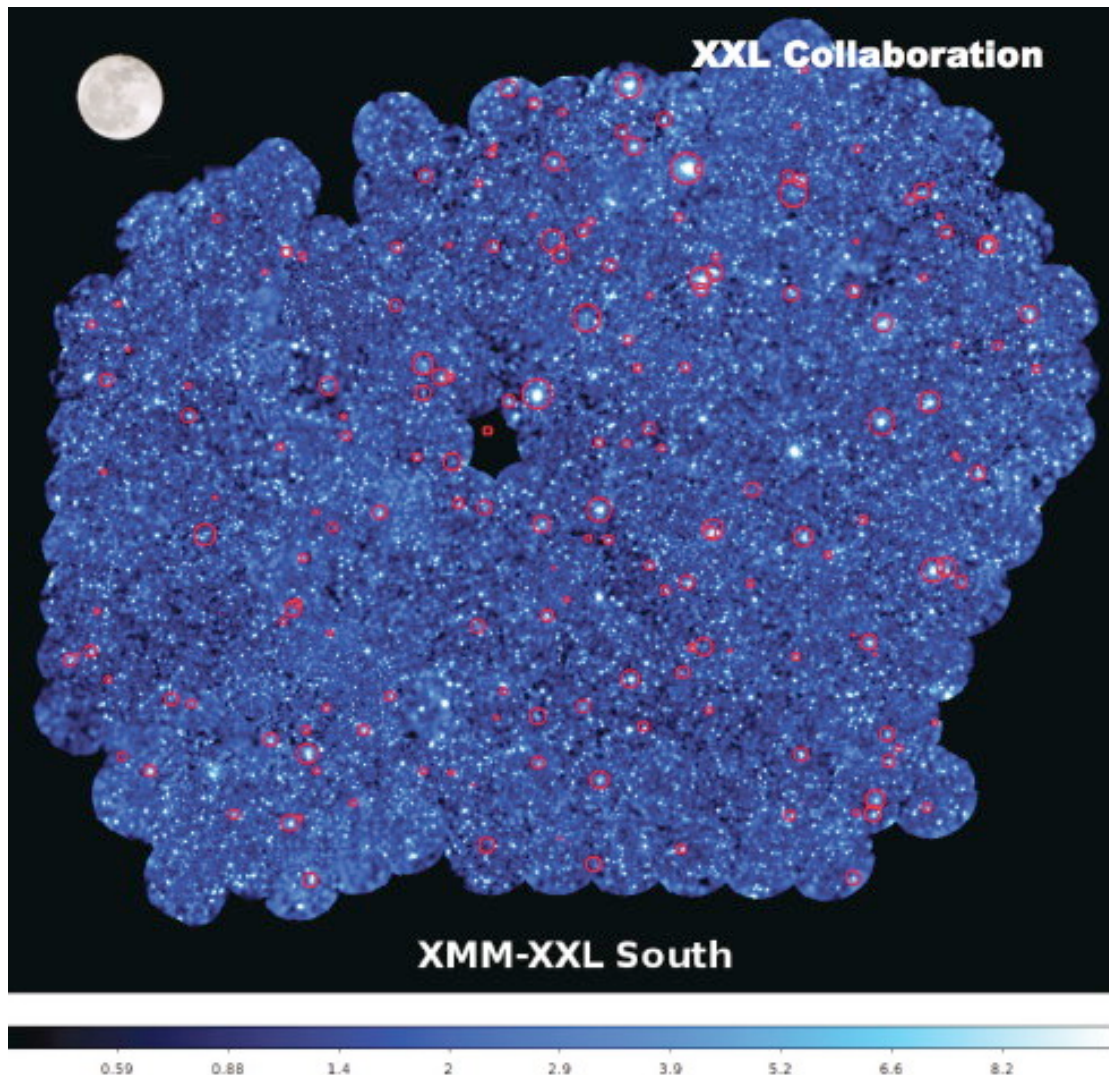


Figure 1: Région du ciel explorée par le satellite XMM-Newton dans le cadre du sondage XXL. Il s'agit ici de la partie sud (XXL-S). La partie Nord est de même surface. Près de deux cents amas de galaxies ont été détectés (cercles rouges) ainsi que plus de 10 000 quasars et noyaux de galaxies actives (AGN). Crédit Projet XXL - S. Snowden, L. Faccioli, L. Pacaud.

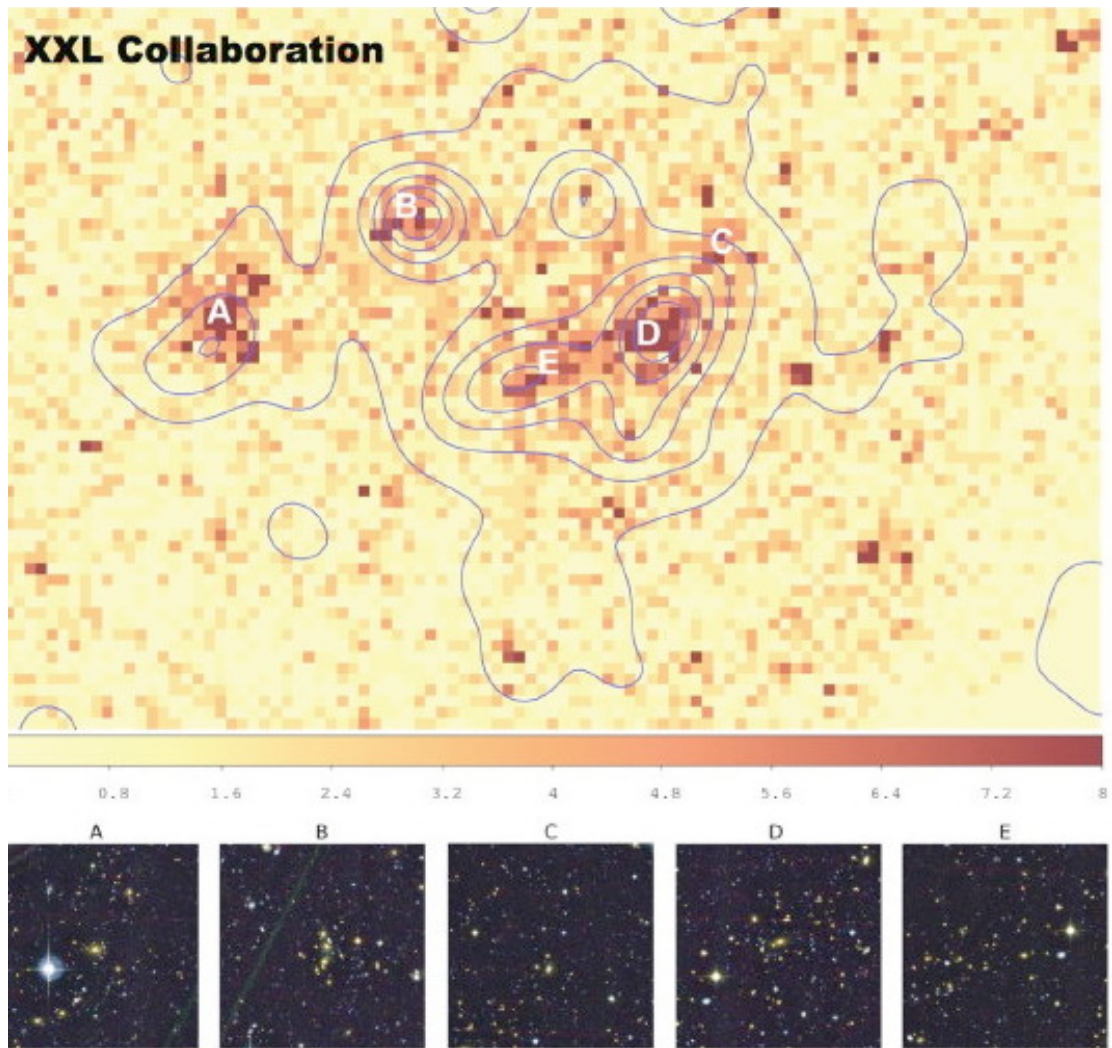


Figure 2: Image en rayons X du super-amas XLSSC-e avec les contours optiques superposés (CFHTLS), montrant les 6 amas dont il est composé (5 visibles sur l'image, marqués A-B-C-D-E). La taille de l'image est 20x13 minutes. Chacun de ces amas a une masse variant de 70 000 à 410 000 milliards de masses solaires.

## **Y a-t-il un trou noir de cent mille masses solaires près du trou noir supermassif de la Voie Lactée?**

Nous avons souvent rappelé que la plupart des galaxies, incluant la Voie Lactée, contiennent en leur centre un trou noir "supermassif" de plusieurs millions à plusieurs milliards de masses solaires. Celui de la Voie Lactée est relativement petit, avec ses 4 millions de masses solaires. Nous savons aussi qu'il existe dans la Voie Lactée de nombreux trous noirs « stellaires » de quelques masses solaires, formés au moment de l'explosion en supernova d'une étoile de quelques dizaines de masses solaires. Ces trous noirs sont observés sous forme de ce que l'on nomme des ULX, pour sources « UltraLumineuses en rayons X ».

Mais existe-t-il des trous noirs de masse intermédiaire? Depuis plusieurs années, une violente controverse agite la communauté concernant ces IMBHs (Intermediate Mass Black Holes). Parmi les ULX, des candidats IMBHs ont en effet été proposés à cause de leur très grande luminosité: ce seraient des trous noirs stellaires de quelques centaines à quelques milliers de masses solaires. Le candidat le plus intéressant est l'objet ESO 243-49 HLX-1 (HLX pour Hyper Luminous X-ray), qui pourrait atteindre dix milles masses solaires. Mais la nature de cet objet comme celle des autres candidats IMBHs n'est pas encore claire. Certains spécialistes pensent que ce ne sont pas des trous noirs de masse intermédiaire, mais simplement des trous noirs de quelques dizaines de masses solaires émettant plus de rayonnement que la quantité habituelle de leurs semblables, peut-être parce qu'ils ont plus de matière à se mettre sous la dent. Par ailleurs, on a trouvé également d'autres candidats IMBHs dans plusieurs amas globulaires sur des bases complètement différentes: la grande largeur de leur raies spectrales traduit des grandes vitesses dues à la présence d'une masse importante au sein de l'amas. Mais aucune de ces découvertes n'a encore été confirmée, même celle qui a fait grand bruit il y a quelques années, d'un trou noir de dix mille masses solaire au centre de l'amas Omega Centauri.

Alors que les trous noirs stellaires ont une origine bien connue, ce n'est pas le cas des trous noirs supermassifs, dont on ignore encore le mode de formation. Un premier scénario possible est celui de l'existence au centre d'une galaxie au moment de sa formation d'une "graine" de trou noir de quelques dizaines ou quelques centaines de masses solaires créée par l'explosion d'une étoile très massive, qui accréterait ensuite la matière tombant vers le centre de la galaxie. Un deuxième scénario est celui de l'existence dans la Galaxie d'amas compacts d'étoiles possédant des trous noirs de plusieurs milliers de masses solaires. Ces amas devraient plonger vers le centre de la galaxie par suite de la friction avec le gaz et les autres étoiles de la Galaxie, et leurs trous noirs devraient fusionner en créant un trou noir supermassif.

Ce deuxième scénario paraît assez plausible. On pense en effet que la Voie Lactée a grossi en capturant au cours de sa vie de nombreuses galaxies naines se trouvant dans son environnement. Elles ont été alors déshabillées d'une partie de leur gaz et de leurs étoiles (Omega Centauri en est très probablement un exemple). On connaît une vingtaine de galaxies naines autour de la Galaxie, qui seront « cannibalisées » ainsi dans le futur. Or on a trouvé récemment que plusieurs galaxies naines contiennent un trou noir supermassif, détecté soit par une émission caractéristique, soit par des vitesses élevées de leurs étoiles. Le deuxième scénario est d'autant plus plausible qu'il existe des galaxies contenant deux trous noirs supermassifs qui semblent être le résultat d'une fusion récente. Dans le cadre de ce scénario, on devrait donc s'attendre à ce qu'il existe plusieurs trous noirs de masse intermédiaire dans la Voie Lactée, en particulier près de son centre. Malheureusement, ils sont certainement très difficiles à observer au moins dans le domaine visible. C'est autre chose dans le domaine radio, par contre.

Une équipe japonaise vient de publier un article (arXiv:1512.04661v1, Tomohary Oka et al., sous presse dans *Astrophysical Journal Letter*) dans lequel elle annonce avoir probablement détecté un trou noir d'une centaine de milliers de masses solaires au voisinage du trou noir central de la Voie Lactée, Sgr A\*. Cette équipe avait utilisé dans le passé une antenne millimétrique de 10 mètres de diamètre construite par les japonais, qui a servi de prototype pour la construction de réseau international ALMA (l'Atacama Large Millimeter Array) installé au Chili. Elle avait déjà détecté des anomalies dans les vitesses des nuages moléculaires proches du centre galactique. Pour la présente étude, l'équipe s'est servi d'une antenne semblable, mais de 45 mètres de diamètre, située à Nobeyama au Japon.

Utilisant la capacité de ce télescope à détecter les raies moléculaires de le monoxyde de carbone CO, les chercheurs japonais ont établi la carte en vitesses d'un nuage moléculaire compact situé à environ 200 années-lumière du centre galactique, CO-0.40-0.22 (notons que l'hydrogène moléculaire, beaucoup plus abondant que l'oxyde de carbone, ne peut être observé car il n'a pas de raies dans le domaine radio ou millimétrique). D'après les élargissements de ces raies, on déduit l'existence de vitesses aléatoires très importantes qui sont la manifestation d'une grosse masse située au sein du nuage.

Les chercheurs ont donc voulu reproduire ces vitesses à l'aide d'une simulation numérique, et ils ont montré qu'il fallait postuler l'existence dans le nuage moléculaire d'un astre qui contiendrait environ 100.000 masses solaires dans une région de 0,6 années-

lumière. On pense évidemment à un trou noir, bien qu'il soit possible d'imaginer un amas d'étoiles très compact. Mais un tel amas serait très instable et se détruirait rapidement en donnant un trou noir.

Il reste cependant un problème : aucune émission infrarouge ni X n'est détectée en provenance de ce nuage, alors que l'on pourrait s'y attendre avec un trou noir. Les chercheurs japonais répondent qu'on sait qu'il existe plusieurs millions de trous noirs dans la Voie lactée, correspondant à toutes les étoiles massives qui ont explosé depuis sa formation. Or seulement une vingtaine ont été repérés, ce qui signifie que les autres ne peuvent pas rayonner car ils ne reçoivent plus aucune matière en provenance de leur environnement.

D'autres explications pour les grandes vitesses observées que l'hypothèse d'un trou noir intermédiaire au sein du nuage CO-0.40-0.22 peuvent toutefois être invoquées. Mais bien que la conclusion des chercheurs japonais soit encore spéculative, cette observation ouvre une nouvelle perspective pour la recherche de candidats IMBHs dans la Voie lactée.

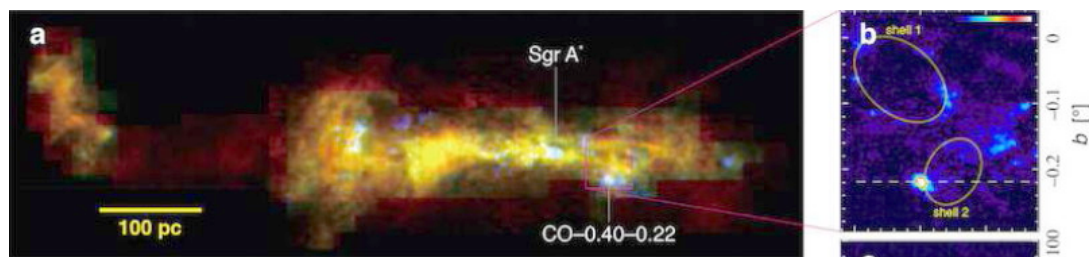


Figure 1: L'image de gauche montre le centre de la Voie lactée observé dans les longueurs d'onde des émissions des molécules de monoxyde de carbone (CO). Les régions les plus denses correspondant au trou noir intermédiaire sont en blanc. L'image de droite montre les émissions en coquille (« shell » en anglais) de la molécule de HCN. L'une d'elle subit l'influence du champ de gravitation du nuage CO-0.40-0.22. Crédit Tomoharu Oka, Keio University.