

Un super amas de galaxies existant au début de l'Univers surprend les astronomes

Les cosmologistes s'accordent depuis une quarantaine d'années pour penser que l'Univers s'est structuré depuis les plus petits objets jusqu'aux plus gros, formés par accumulation de matière. On s'attendrait donc à trouver des amas de galaxies plus grands actuellement que dans le passé (c'est-à-dire à grande distance). Or on vient de découvrir un amas de galaxies lointain absolument gigantesque.

Une équipe internationale conduite par une astronome italienne de l'Université de Bologne vient de détecter une structure gigantesque qu'elle a baptisé Hyperion, en référence à l'un des Titans de la mythologie grecque, groupant un million de milliards de masses solaires et ayant existé seulement deux milliards d'années après le Big Bang (voir figure 1). L'équipe a publié un article concernant cette découverte (Olga Cucciati *et al.*, arXiv:1806.06073v3, sous presse dans *Astronomy & Astrophysics*). Expliquons-la.

L'équipe a utilisé l'instrument VIMOS (Visible Multi-Object Spectrograph) installé sur l'un des VLT (*Very large telescope*) de l'ESO au Chili. VIMOS, à la construction duquel ont participé activement plusieurs laboratoires français, est à la fois un imageur grand-champ et un spectrographe multi-objets qui fonctionne dans les longueurs d'onde visibles (de 360 à 1000 nm). Il est donc capable d'observer un grand nombre d'objets tout en mesurant leurs décalages spectraux dus à l'expansion de l'Univers, et c'est ainsi qu'il a permis d'effectuer un relevé donnant les distances et les positions d'un ensemble de galaxies lointaines, le VIMOS Ultra-Deep Survey (VUDS). En ciblant une dizaine de milliers de galaxies se trouvant dans des champs connus, l'équipe a ainsi pu mettre en évidence, à l'aide d'une méthode proposée par Olivier Lefèvre de l'Université d'Aix-Marseille, l'existence d'une immense structure s'étendant sur 60x60x150 Megaparsec cube (volume reporté à l'époque actuelle). Elle contient au moins sept pics de densité dont il a été possible de déterminer les masses individuelles, en utilisant les dispersions de vitesses des galaxies à l'intérieur de chaque sous-structure. Notons cependant que cette détermination est faite sous l'hypothèse que chaque structure a déjà atteint son équilibre.

Ce proto-superamas constitue à ce jour la structure la plus étendue et la plus massive découverte datant d'une époque aussi reculée. **Normalement, ce type d'amas ne se rencontre qu'à des distances proches** et correspond à des stades plus avancés où l'Univers a eu le temps de se structurer sous l'effet de la gravité. Mais malgré sa taille, Hyperion possède tout de même, avec ses concentrations denses, des caractéristiques montrant que c'est une structure dont l'effondrement gravitationnel n'est pas terminé, ce qui indique bien que l'on est encore au début de l'histoire du cosmos. Il devrait être devenu actuellement semblable aux superamas qui composent l'Univers local, comme le superamas de la Vierge où se trouve la Voie lactée. Malheureusement nous ne pourrons jamais le voir ainsi, puisque nous ne sommes capables d'explorer que des tranches de l'espace-temps ! Mais le comparer à des objets semblables récents offre un aperçu de l'évolution des structures les plus massives de l'Univers depuis un lointain passé.

Figure 1 : eso-amas.jpg : Image reconstruite de l'amas Hyperion. Crédit ESO.

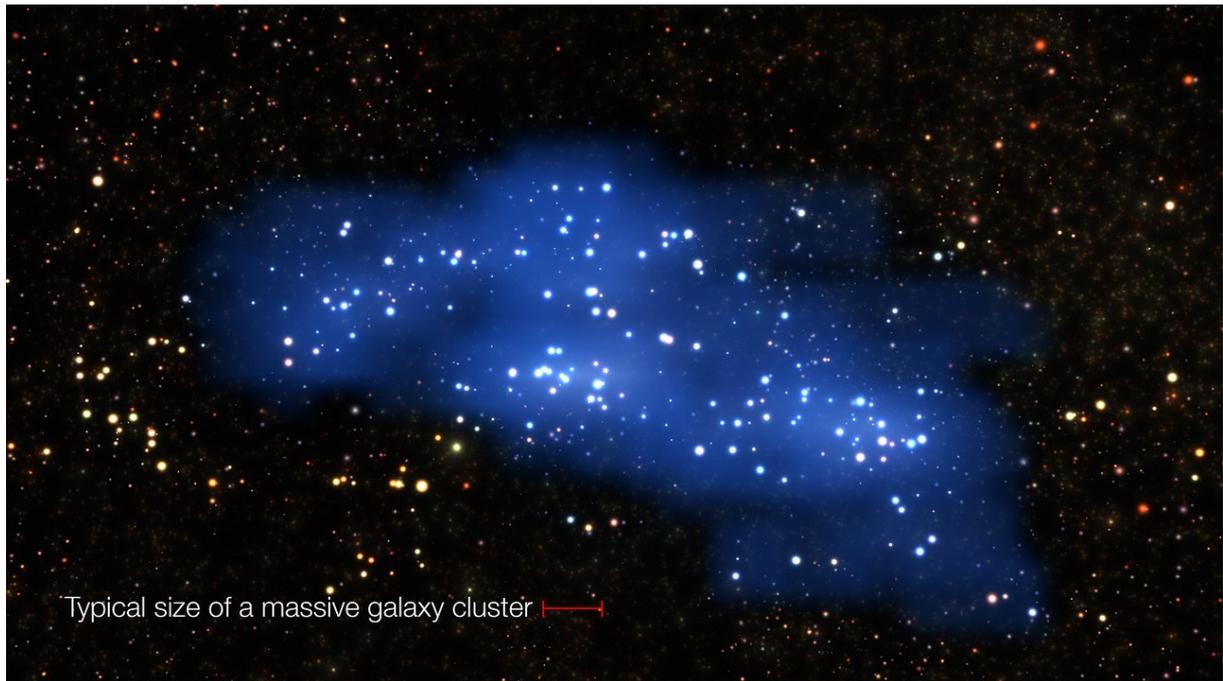
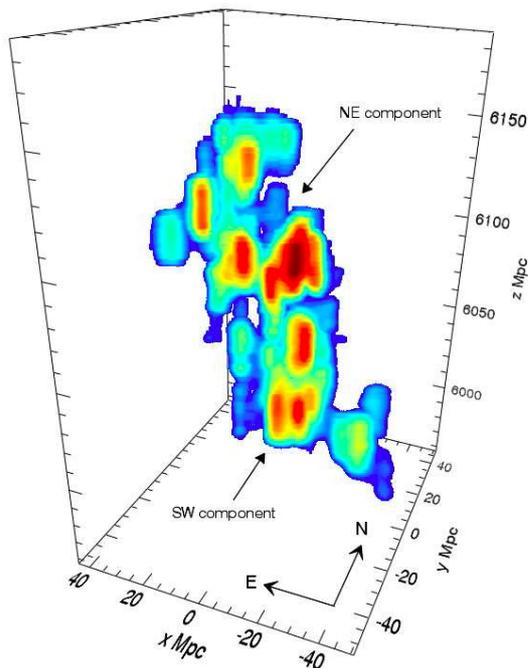


Figure 2 : amas.jpg : Figure à 3 dimensions de l'amas Hyperion. Les unités sont des Megaparsecs covariants (c'est-à-dire que l'on suit l'expansion de l'Univers). L'échelle des contours est en logarithme, depuis le bleu (densité dépassant la moyenne de 2 sigmas) jusqu'au rouge (8 sigmas). Crédit Cucciati *et al.*, arXiv:1806.06073v3.



Un « microquasar » éclaire le fonctionnement des quasars

Nous avons parlé dans une actualité du précédent numéro de *l'Astronomie* du neutrino provenant d'un quasar, qui permettait de comprendre l'origine des particules ultra-énergétiques observées sur Terre. Depuis, un autre mystère pourrait bien être résolu aussi, celui de leur mécanisme de formation, grâce à l'observation d'un « micro-quasar ».

Dans la Voie lactée, SS433 appartient à un groupe d'une douzaine d'objets connus depuis des décennies, qu'on appelle des micro-quasars. Ce sont des systèmes d'étoiles doubles, dans lesquels un trou noir accréte la matière de sa compagne géante. **Les microquasars et les quasars possèdent les mêmes ingrédients essentiels**, un trou noir, un disque pour accréter la matière, et des jets de particules « relativistes » c'est-à-dire ayant des vitesses proches de celle de la lumière. La différence principale entre les deux est la masse du trou noir. Dans les microquasars, elle est de quelques fois la masse du Soleil, tandis que les trous noirs dans les quasars ont une masse de plusieurs millions voire plusieurs milliards de masses solaires.

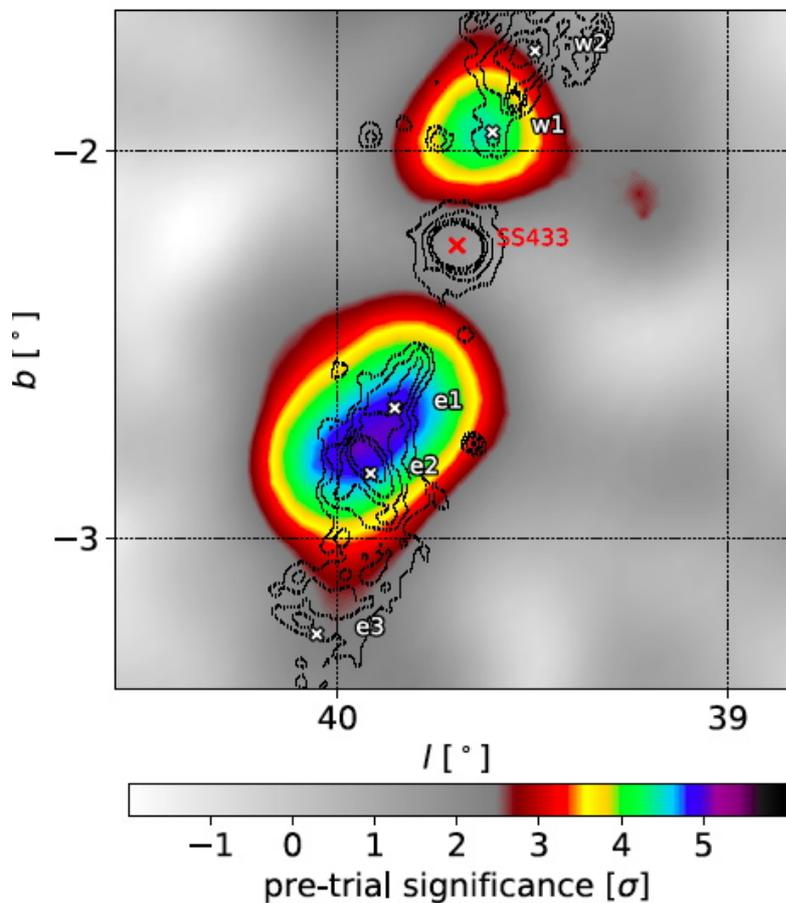
Dans le cas de SS433, on observe deux jets symétriques permanents en précession (ce qui est exceptionnel), dont la vitesse est égale à 26% de celle de la lumière. Ils se terminent dans une sorte de nébuleuse, W50, qui est en fait un reste de supernova probablement produite au moment de la formation du trou noir. La luminosité de SS433 est également exceptionnelle, car elle dépasse dix millions de fois celle du Soleil.

Plus d'une centaine de chercheurs appartenant à une trentaine de laboratoires, conduits par un chercheur du Département de physique et d'astronomie de l'Université de l'Utah aux USA, ont observé SS433 pendant 1017 jours grâce à l'observatoire HAWC (High Altitude Water Cherenkov) installé à 4100 mètres d'altitude sur le flan d'un volcan dans l'état de Puebla au Mexique. Ce détecteur consiste en 300 réservoirs d'eau munis chacun de 5 photomultiplicateurs sensibles aux flashes de lumière Cherenkov. Celle-ci, que nous mentionnons souvent dans ces actualités, est émise lorsqu'une particule se déplace dans un fluide à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le milieu, mais évidemment inférieure à la vitesse de la lumière dans le vide. Les particules en question sont générées par la collision de rayons gamma ou de particules très énergétiques provenant de l'espace avec des molécules de l'atmosphère. Elles ont typiquement des énergies de 100 gigaelectronvolts (GeV) à 100 teraelectronvolts (TeV), soit environ mille milliards de fois celle d'un photon visible, et sont plus énergétiques que celles du grand accélérateur LHC du CERN ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ et $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$). Pendant cette période de 1017 jours, on a enregistré des photons Cherenkov d'énergie supérieure à 25 TeV, soit dix fois plus grandes que celles observées pendant toutes les années précédentes en provenance des autres microquasars.

À la suite de ces observations, les chercheurs ont publié un article annonçant la découverte de particules accélérées à de très hautes énergies dans SS433 (A.U. Abeysekara *et al.*, arXiv:1810.01892v1, et *Nature* 562, p.82). Ce qui a été une grande surprise pour eux, c'est de découvrir que les photons ne provenaient pas de l'environnement proche du trou noir, mais de régions éloignées situées de part et d'autre des jets, à 120 années-lumière de SS433, à l'endroit de la collision avec le reste de supernova. Et ils n'étaient pas au bout de leurs surprises ! Car contrairement à ce qui se passe pour le quasar mentionné dans l'actualité du numéro précédent, il ne pouvait être question d'une amplification relativiste due à la proximité de la direction du jet avec la ligne de visée, puisque dans le cas de SS433, l'émission est pratiquement perpendiculaire à la ligne de visée : si les photons de 25 TeV étaient émis directement par des particules comme des protons, il faudrait qu'elles aient une

énergie de 250 TeV au moins ! Les auteurs concluent donc qu'il s'agit plus probablement d'une émission par une population d'électrons moins énergétiques qui cognent les photons radio du fond diffus cosmique et les transforment en rayons gammas de très haute énergie (c'est ce qu'on appelle « l'effet Compton inverse »). Le reste du rayonnement de moindre énergie serait émis directement par l'effet « synchrotron » dû aux mêmes électrons circulant dans un champ magnétique. Tout cela provenant des chocs entre les jets et le reste de supernova. Et effectivement l'énergie totale de ce rayonnement pendant les 30 000 années de vie présumée de SS433 correspond bien à celle qui est emmagasinée dans les jets. Ainsi l'observation de SS433 va peut-être permettre de comprendre mieux celle des quasars...

Figure SS433-Tev.jpg : Image obtenue à très haute énergie de la région entourant SS 433. L'échelle de couleurs donne la signification statistique des photons en excès sur le fond après soustraction de la source étendue. Les endroits des chocs observés en rayons X sont indiqués : e1, e2, e3, w1, w2, de même que le centre du couple d'étoiles. Les contours solides correspondent à l'émission X. Crédit A.U. Abeysekara et al., arXiv:1810.01892v1.



De l'hydrogène chaud omniprésent aux débuts de l'Univers

L'hydrogène est l'élément le plus simple et le plus répandu dans l'Univers (98% en nombre de particules, et 74% en masse). Il a été créé au moment du Big Bang en même temps que l'hélium, tandis que les éléments les plus lourds ont été créés plus tard au sein des étoiles. On devrait donc le trouver en grande quantité dans l'Univers jeune.

De fait, on l'observe grâce à la raie Lyman alpha en absorption (raie située à 121,5 nm correspondant à la transition entre le niveau fondamental de l'atome et le deuxième niveau) qu'il crée dans les spectres des quasars lointains. Mais les nuages d'hydrogène qui les produisent sont situés nécessairement sur la ligne de visée de quasars brillants. Or ces quasars sont peu nombreux, et l'observation est donc limitée à quelques rares objets. On découvre cependant que l'hydrogène est présent quasiment sur toute leur ligne de visée, ce qui donne à penser qu'il est présent partout.

Malheureusement on ne voit que rarement la raie en émission provenant de régions éloignées des quasars ou des galaxies. Cet hydrogène en émission est un traceur de gaz relativement chaud (à 10 000 degrés environ). Notons que pour les galaxies lointaines, la raie Lyman alpha est repoussée dans le domaine visible à cause du décalage spectral et on peut donc l'observer avec des instruments au sol (par exemple, pour un décalage ou « redshift » de 3, elle est déportée à $121,5 \times 4 = 486$ nm).

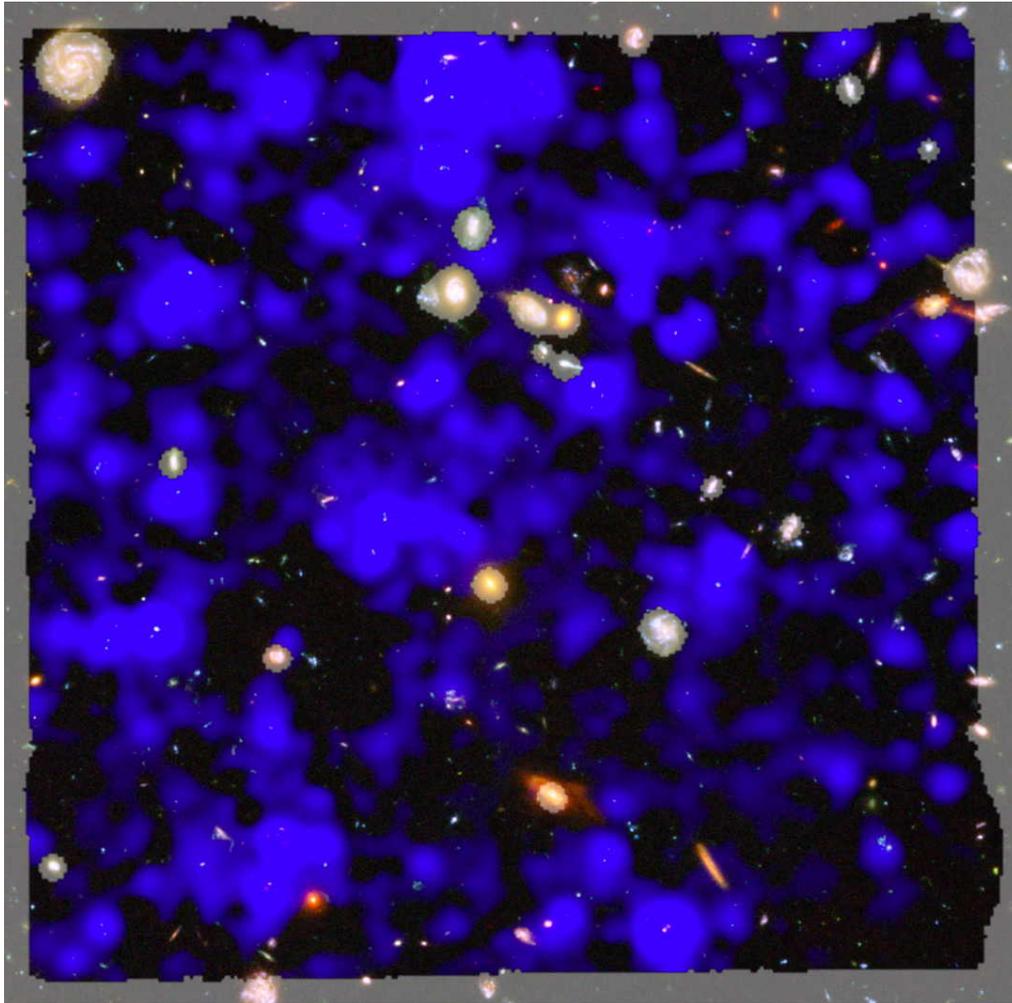
Pourquoi ne peut-on détecter cet hydrogène en émission, alors qu'on s'attend à ce qu'il soit présent à profusion autour des galaxies jeunes ? Il doit en effet être produit à la fois par les flots de gaz provenant du milieu intergalactique et tombant sur les galaxies, et par des flots provenant des vents galactiques et poussés vers le milieu intergalactique. C'est que l'intensité de Lyman alpha en émission est très faible car elle dépend fortement de la densité volumique du gaz, et elle n'avait pas pu être détectée jusqu'à maintenant sauf dans quelques nuages particulièrement denses.

Une équipe internationale conduite par un chercheur allemand et comprenant plusieurs Français des Universités de Lyon et de Toulouse vient de publier un article annonçant que la couverture du ciel en Lyman alpha est complète autour des galaxies lointaines (L. Wisotzki *et al.*, arXiv:1810.00843v2, *Nature* 562, 229). Ces chercheurs ont réussi à détecter la raie Lyman alpha en émission en utilisant l'instrument MUSE (Multi-Unit Spectroscopic Explorer) installé en 2014 par les équipes françaises sur l'un des VLT de l'ESO au Chili, et construit en particulier dans ce but. En additionnant les spectres obtenus, ils ont pu observer l'hydrogène autour de 270 galaxies de décalage spectral compris entre 2,9 et 6,6, ce qui correspond à une période cruciale de la formation et de l'évolution des galaxies aux alentours du premier milliard d'années après le Big Bang. Pour cela, ils ont effectué de très longues poses dans les deux champs les plus profonds observés par le télescope Hubble, le Hubble Deep Field South (HDFS) et le Hubble Ultra Deep Field (HUDF), et ils ont additionné les résultats pour faire apparaître des caractéristiques trop faibles pour être détectées individuellement. On se rend alors compte que **l'hydrogène est présent partout dans l'Univers jeune**, et pas seulement au voisinage des galaxies.

Par contre, il n'est pas évident d'identifier la cause de l'émission. Elle n'est plus causée par le chauffage des galaxies environnantes, puisqu'elle est présente partout, même loin de galaxies. Elle pourrait être due à la fluorescence excitée par le rayonnement cosmique ultraviolet. Ce

qui suggérerait l'omniprésence d'une lumière ultraviolette dans le cosmos jeune, et ouvrirait une fenêtre sur une matière cosmique invisible avant. Un nouveau champ de recherche à venir...

Figure Lalfa.jpg : Distribution de l'émission Lyman alpha observée dans le Hubble Ultra Deep Field (HUDF). L'image sous-jacente est un composite obtenu par le télescope Hubble, restreinte à une section de 1' x 1' observée par MUSE. L'émission détectée par MUSE, sommée sur les redshifts de 3 à 6, est surimposée en bleu. Crédit L.Wisotzki et al., arXiv:1810.00843v2, et ESO.



La loi de Hubble devient la loi de Hubble-Lemaître

L'Union Astronomique Internationale (UAI) vient de procéder à un vote électronique décidant par 4060 votes, dont 78% pour, 20% contre, et 2% d'abstention, de changer le nom « loi de Hubble » en « loi de Hubble-Lemaître ». Cette loi qui décrit l'expansion de l'Univers avait en effet été découverte à la fois théoriquement et observationnellement en 1927 par l'abbé Georges Lemaître, professeur à l'Université de Louvain, qui avait publié ce résultat en français dans une revue belge peu connue. Hubble publia en 1929 l'article fondateur de sa loi dans l'*Astrophysical Journal*. Une controverse sur le sujet de savoir si Hubble était ou non au courant des résultats de Lemaître n'est pas encore résolue. En France, Jean-Pierre Luminet (qui a écrit entre autre l'article sur Stephen Hawking dans l'*Astronomie*) a fortement contribué à défendre la mé