

Abell 3411 et Abell 3412 : deux amas de galaxies en collision permettent de comprendre comment sont entretenues les « sources radio fossiles »

Ainsi que nous le savons, l'Univers est constitué d'un « filet cosmique » à trois dimensions. Les amas de galaxies, situés aux nœuds de ce filet, croissent au cours du temps soit en capturant des filaments de gaz, soit en fusionnant entre eux. Les fusions d'amas sont les phénomènes les plus puissants de l'Univers : ils produisent en quelques milliards d'années l'énergie totale accumulée dans cent milliards de Soleils ! Cette énergie est convertie en chauffage du gaz intergalactique par des ondes de choc, qui sont alors capables d'accélérer des particules chargées jusqu'à des vitesses très élevées par un mécanisme d'aller-retour découvert par le grand physicien Fermi. Or on trouve autour des galaxies situées dans les amas des sources de rayonnement radio appelées des « fossiles radio ». Elles sont constituées de particules relativistes – c'est-à-dire de particules se déplaçant à des vitesses très proches de celle de la lumière –, qui rayonnent par effet « synchrotron » [1]¹ en émettant le rayonnement radio observé. Mais ces particules perdent en rayonnant toute leur énergie si rapidement qu'elles ne peuvent survivre longtemps, et qu'elles doivent donc être ré-accélérées en permanence pour expliquer les sources « fossiles ». On pensait que la ré-accélération était due aux chocs produits lors des collisions des amas de galaxies. Encore fallait-il le prouver.

Une équipe internationale d'une vingtaine d'astronomes, conduite par un jeune chercheur du Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics à Cambridge (États-Unis) (arXiv:1701.01439v2, Reinout J. vanWeeren *et al.*, 2017, premier numéro de *Nature Astronomy*), annonce avoir découvert une connexion directe entre une source fossile et les chocs produits par la collision de deux amas en train de fusionner, Abell 3411 et Abell 3412. Cet amas double est situé dans la constellation de l'Hydre et distant de deux milliards d'années-lumière. Son observation en rayons X par le télescope spatial Chandra a révélé sa forme cométaire, l'un des amas formant la « tête » de la comète (figure 1). L'analyse des spectres de 174 galaxies obtenus avec les télescopes au sol Keck et Subaru, à Hawaï, indique que les deux amas ont à peu près la même masse – de l'ordre de mille milliards de masses solaires –, et qu'ils sont en collision depuis un milliard d'années, l'axe de la collision étant dans le plan du ciel. Le cœur de l'amas, situé au nord et provenant du sud, était suffisamment compact pour avoir survécu à la collision, tandis que l'autre amas, provenant du nord et actuellement situé au sud, a été presque complètement disloqué.

Les particules relativistes de la source fossile observée sont produites par une galaxie active présente dans l'un des deux amas (dans les galaxies actives, le trou noir supermassif central est en train d'accréter de la matière, ce qui crée de puissants jets de particules). Une observation détaillée effectuée par le Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT), aux Indes, montre dans la partie sud de l'amas une structure complexe, constituée d'une source radio fossile clairement liée au trou noir supermassif de la galaxie active, tandis que l'analyse en rayons X indique la présence d'un choc situé le long de la source fossile, et permettant la ré-accélération des particules relativistes (figure 2).

Cette étude permet donc de comprendre comment sont entretenues les sources radio fossiles. Des observations ultérieures réalisées grâce au réseau LOFAR, qui concerneront des

¹ [1] Le rayonnement synchrotron est produit par des particules relativistes chargées, essentiellement des électrons, se déplaçant dans un champ magnétique.

fréquences radio plus basses et plus sensibles aux vieilles sources radio dans lesquelles les particules ont déjà perdu une partie de leur énergie, permettront d'en savoir plus sur ce phénomène fondamental pour le milieu intergalactique.

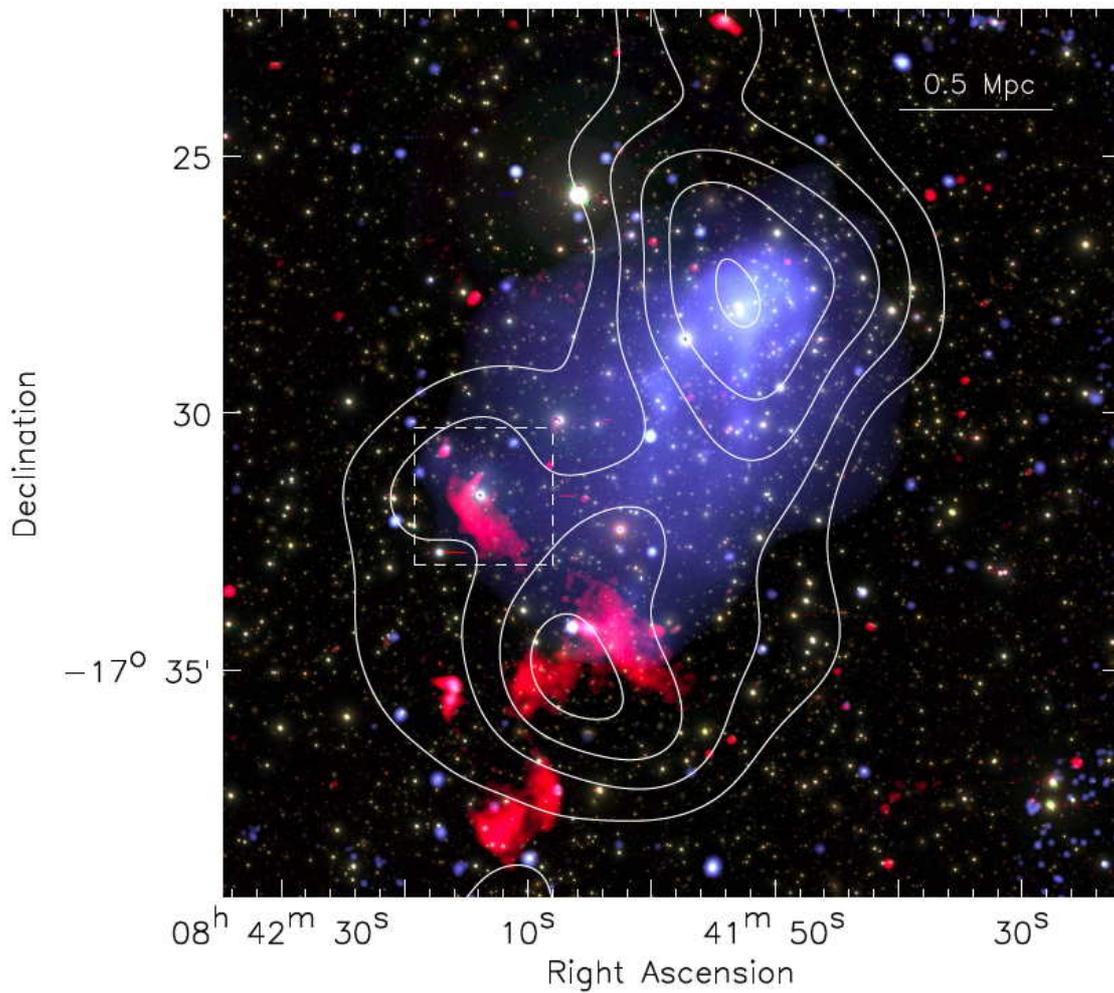
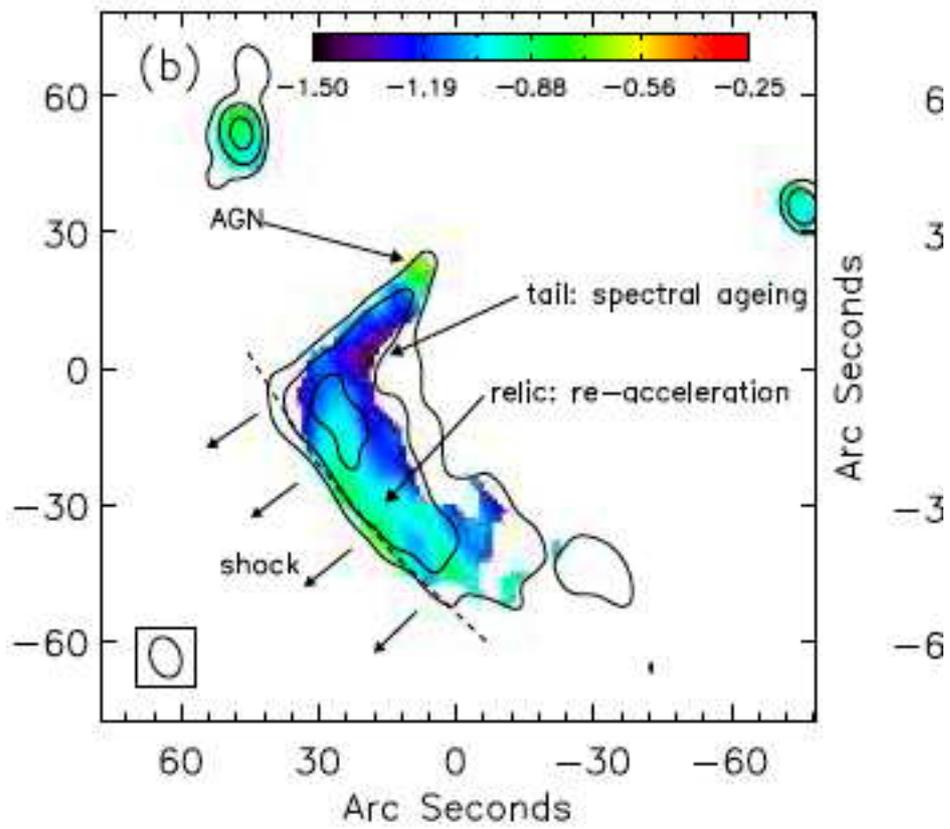


Image en couleurs GRI de l'amas double Abell 3411-3412, obtenue avec le télescope Subaru, superposée à l'image radio (en rouge) obtenue avec le GRMT. L'image en rayonnement X procurée par le télescope spatial Chandra est en bleu. La distribution des galaxies est indiquée par les contours blancs. Le carré en tirets correspond à la région représentée sur la figure 2.



Contours d'une source radio fossile dans l'amas double Abell 3411-3412, obtenus avec le radiotélescope GRMT, tandis que la ligne en tirets montre la position d'un choc observé en rayonnement X. On voit que les deux phénomènes sont liés.

Le rayonnement des pulsars expliqué par la géométrie de leur environnement

Rappelons qu'un pulsar est une étoile à neutrons formée lors de l'effondrement du cœur d'une étoile massive (dont la masse est supérieure à 3 masses solaires) ayant épuisé son carburant nucléaire, effondrement qui s'accompagne de l'explosion et de l'expulsion des couches extérieures de l'étoile en supernova. Véritables toupies cosmiques, les pulsars ont été découverts il y a cinquante ans grâce aux faisceaux périodiques de rayonnement radio qui nous en parviennent si l'axe de leur champ magnétique (distinct de leur axe de rotation) traverse notre ligne de visée au cours de leur rotation. Par la suite, on s'est aperçu que les pulsars émettent non seulement du rayonnement radio pulsé, mais également des faisceaux de rayons gamma de haute énergie ainsi que du rayonnement X.

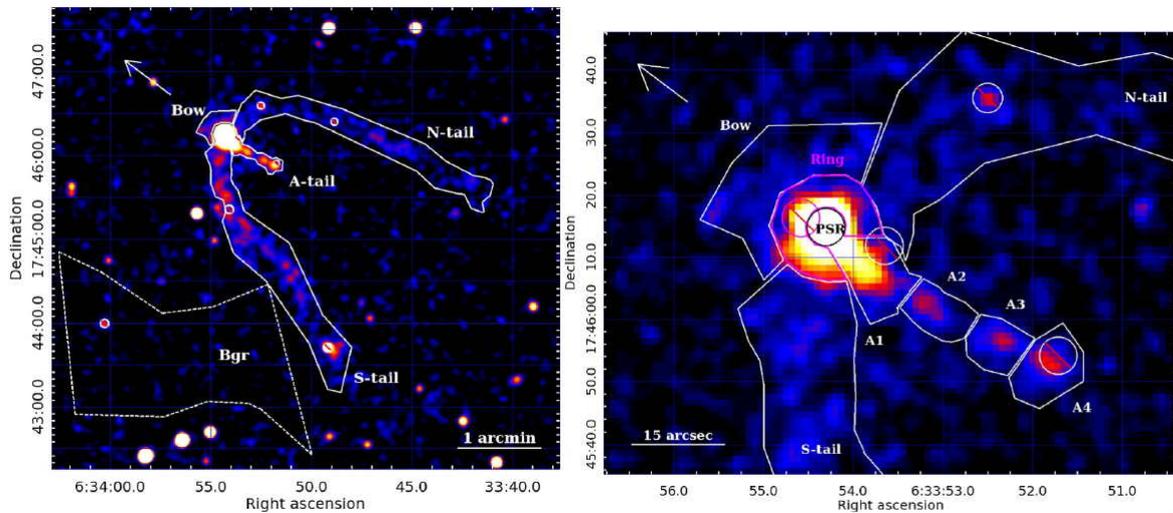
Contrairement à ce que l'on pouvait imaginer, les caractéristiques respectives des pulsations radio et gamma sont souvent différentes ; il arrive même que certains pulsars ne présentent pas d'émission radio, tandis que d'autres sont dépourvus d'émission gamma. Ces particularités ont soulevé de nombreuses discussions concernant, entre autres, la géométrie des régions émissives, mais, jusqu'à maintenant, le problème n'était pas résolu.

Deux équipes internationales, essentiellement nord-américaines, viennent de publier deux articles qui jettent une lumière nouvelle sur le phénomène (arXiv:1611.03496v1, Posselt *et al.*, et arXiv:1610.06167v1, Noel Klinger *et al.*). Le premier article est une étude du pulsar célèbre et très étudié Geminga, distant de seulement 800 années-lumière de la Terre, et le second, d'un pulsar un peu moins connu, B0355+54, distant de 3 300 années-lumière. Dans les deux cas, les chercheurs se sont intéressés surtout au vent produit suivant l'axe de rotation de ces objets (*Pulsar Wind Nebula*). Ce vent émet d'intenses rayons X, qu'ils ont soigneusement observés grâce au satellite Chandra, de la Nasa. Sa forme est modelée par la course rapide de l'étoile à travers le milieu interstellaire. Ainsi, dans Geminga, le vent consiste en deux structures latérales allongées d'au moins une année-lumière et d'une queue quatre fois moins étendue, située derrière le pulsar et segmentée en plusieurs petits nuages brillants dont l'intensité et le nombre varient en une durée d'environ un mois (figure 1). Dans l'autre pulsar, une seule queue étroite s'étend jusqu'à cinq années-lumière derrière l'étoile (figure 2). Geminga ne présente pas d'émission radio, tandis que B0355+54, l'un des plus puissants pulsars radio, n'émet pas de rayons gamma ! Quelle est la cause de ces différences ?

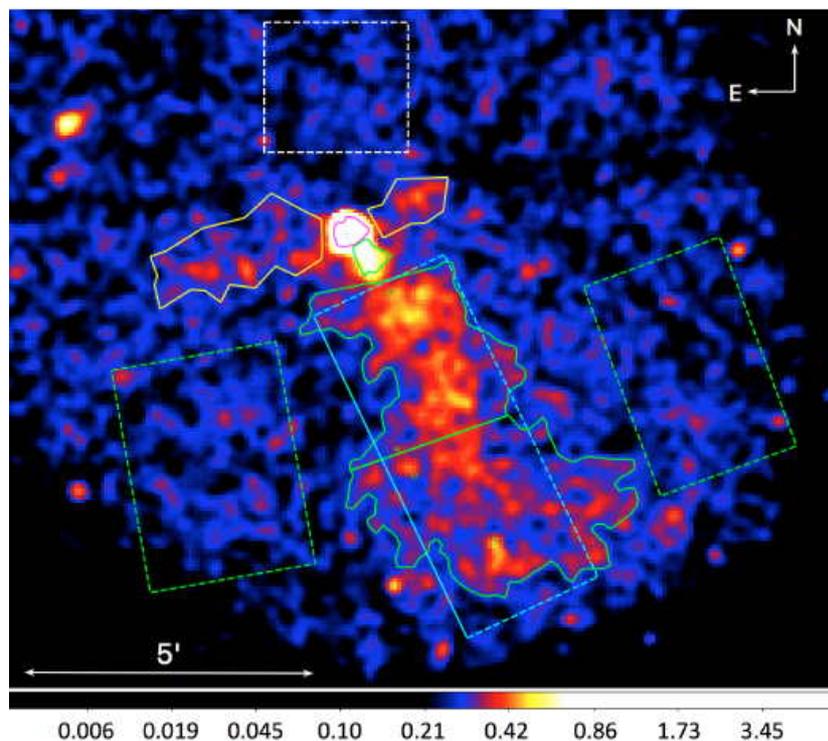
C'est justement l'apparence de la queue qui peut les expliquer. En effet, l'émission radio est due à des jets de particules produits tout près des pôles magnétiques, tandis que les rayons gamma sont émis à des altitudes élevées, dans une zone étendue couvrant une grande région du ciel. Geminga aurait des pôles magnétiques presque alignés avec son axe de rotation, tandis que les pôles magnétiques de B0355+54 seraient dirigés vers la Terre. Dans Geminga, on voit les pulsations gamma, mais les faisceaux d'onde radio situés près des jets demeurent invisibles, tandis que dans B0355+54 on voit les jets produisant le rayonnement radio pointés vers la Terre, mais pas les régions éloignées d'où proviennent les rayons gamma. Cela suppose que dans le second objet l'axe de rotation est proche de notre ligne de visée, et que le pulsar se déplace dans la direction perpendiculaire à cet axe.

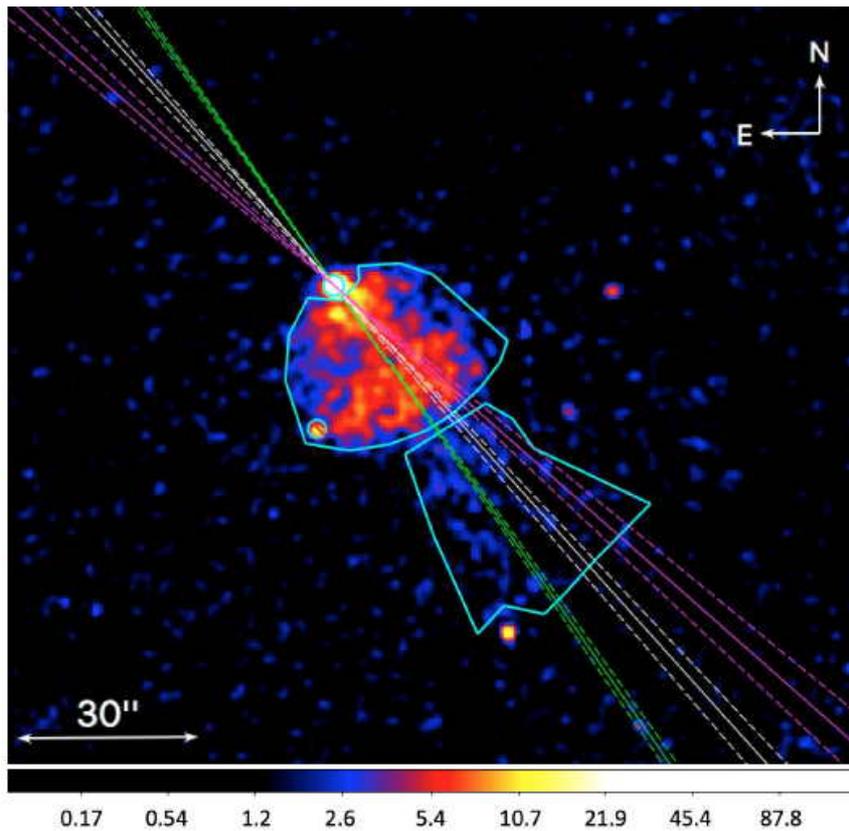
En résumé, ces études détaillées montrent que trois paramètres géométriques, l'axe de

rotation, la ligne de visée et la direction du déplacement du pulsar, déterminent entièrement l'apparence des nébuleuses liées aux pulsars, ainsi que les rayonnements qui nous en parviennent.



Images en rayons X observées autour de Geminga, avec la nomenclature des différentes régions (*tail* : queue ; *bow* : arc). L'échelle de couleurs est destinée seulement à mettre en valeur les régions intéressantes. Les cercles indiquent des sources identifiées et exclues. La région hachurée est utilisée comme fond de ciel. La flèche indique la direction du mouvement du pulsar. Crédit arXiv:1611.03496v1, Posselt *et al.*





Images en rayons X des différentes régions entourant le pulsar B0355+54. En haut, on distingue le pulsar lui-même, une nébuleuse compacte (polygone cyan au nord), et le champignon avec sa tige (polygone cyan au sud). Les lignes en magenta donnent la direction du mouvement, les lignes blanches donnent cette même direction mais après en avoir enlevé le mouvement du Soleil dans la Galaxie et la rotation de la Galaxie, et les lignes vertes donnent l'axe de symétrie de la nébuleuse compacte. La barre colorée est graduée en nombre de photons par seconde carrée. En bas sont montrées la queue (contour en vert avec le trait séparant la région proche et la région éloignée), les « moustaches » (polygones jaunes de chaque côté de la nébuleuse compacte). Les deux rectangles hachurés en vert de part et d'autre de la queue sont les régions utilisées pour le fond de ciel. Crédit arXiv:1610.06167v1, Noel Klingler *et al.*

Les galaxies « déshabillées » beaucoup plus efficacement qu'on ne le pensait

Les galaxies sont de vastes ensembles d'étoiles formées par la contraction, sous l'effet de leur propre gravité, de grands nuages d'hydrogène atomique ou moléculaire. Or on constate que ce processus ralentit au cours du temps et que la quantité de gaz diminue, sans que cela soit imputable à la formation de nouvelles étoiles. Il s'agit en fait de la disparition d'une partie de la matière au sein des galaxies. Comment l'expliquer?

On sait que la morphologie des galaxies dépend beaucoup de leur environnement, et c'est tout naturellement que celui-ci est invoqué pour expliquer le phénomène : ce dernier pourrait être dû à des interactions gravitationnelles avec les galaxies environnantes lorsqu'elles sont proches, ou au balayage des galaxies par le milieu ambiant intergalactique froid ou chaud dans lequel elles se déplacent, qui exerce une pression dynamique capable d'arracher leur gaz (*ram pressure*). Ce dernier phénomène est appelé *stripping* en anglais, ce qui est très compréhensible puisqu'il fait subir aux galaxies une sorte de *strip-tease* ! Pour comprendre la formation et l'évolution des galaxies, il faut donc explorer soigneusement leur lien avec les réservoirs d'hydrogène en même temps qu'avec les masses stellaires qu'elles contiennent, et pour cela disposer de grands relevés de galaxies.

On savait depuis longtemps que le déshabillage des galaxies est très efficace dans les gros amas, dans lesquels un gaz chaud et relativement dense^[1] remplit l'espace. Ce qu'une équipe menée par un chercheur du Centre international de recherche astronomique d'Arecibo vient de montrer, c'est que le déshabillage se produit également dans de petits groupes de galaxies situés à la périphérie des amas, et que c'est en fait le principal mécanisme par lequel ces galaxies sont vidées de leur gaz. L'équipe s'est attaquée au problème en combinant le plus grand relevé optique de galaxies jamais réalisé, le Sloan Digital Sky Survey (dont il a souvent été question ici), avec le plus grand relevé d'observations radio, ALFALFA (Arecibo Legacy Fast ALFA), donnant les mesures de la quantité totale d'hydrogène atomique de plus de 20 000 galaxies de l'Univers proche. Les chercheurs ont divisé les échantillons de galaxies en galaxies centrales d'amas, très massives, en galaxies isolées et en galaxies satellites. Ces dernières, situées à la périphérie des amas, sont plongées dans le halo de matière noire qui les entoureⁱⁱ [2]; ce sont celles-là qui ont suscité l'intérêt des chercheurs. Outre le résultat déjà mentionné, l'article de Toby Brown *et al.* (arXiv:1611.00896v2, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, January 17th, 2017) montre aussi que la perte d'hydrogène atomique dans les halos massifs est beaucoup plus rapide que la suppression de gaz par formation stellaire. En fait, le contenu en gaz des galaxies satellites dépend surtout de la masse du halo de matière noire qui les entoure, résultat en accord avec les simulations numériques actuellement effectuées.



Image d'artiste d'après des observations effectuées avec le télescope spatial Hubble, montrant le déshabillage de la galaxie spirale NGC 4921. Crédit ICRAR, NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

ⁱ [1] Dense par rapport au milieu intergalactique normal, mais tout de même extraordinairement dilué, puisque constitué seulement de quelques milliers d'atomes par mètre cube !

ⁱⁱ [2] Contrairement à la matière ordinaire qui interagit avec le rayonnement, la matière noire n'est sensible qu'à la gravité ; elle constitue 80 % de la masse de l'Univers.