

de l'épaisseur du disque de gaz externe, également découverte en ondes radio. Si on tirait un trait allant du Soleil au centre de la Galaxie, et qu'on le prolongeait de dans la même direction, on s'apercevrait que la couche de gaz est en moyenne à peu près deux fois plus épaisse «à droite» de ce trait (en voyant la Galaxie «du dessus») qu'à gauche. Cette asymétrie est instable et, laissée à elle-même, elle aurait tendance à s'estomper. Elle ne peut persister qu'avec l'assistance d'un mécanisme de soutien. Les astronomes connaissent ce problème depuis plus de 30 ans, mais ils l'avaient laissé de côté jusqu'ici. Cependant, un relevé plus précis de l'hydrogène atomique de la Voie lactée réalisé récemment et une meilleure compréhension des mouvements non circulaires du gaz rendent aujourd'hui cette position intenable.

Les deux principales explications font l'une et l'autre intervenir la matière noire. Soit la Voie lactée et le halo de matière noire ne sont pas concentriques, soit, comme Kanak Saha, de l'Institut Max Planck de Garching, en Allemagne, et ses collègues l'ont récemment défendu, le halo de matière noire est lui-même est un peu asymétrique. Ces deux hypothèses remettent en cause l'idée selon laquelle la Voie lactée et le halo se sont formés ensemble à partir de la condensation d'un unique nuage gigantesque de matière. Si c'était le cas, la matière ordinaire et la matière noire devraient être centrées sur le même point. Ainsi, l'asymétrie de l'épaisseur du disque est un indice supplémentaire que la Voie lactée a grandi par fusion de galaxies plus petites ou par accréation continue de gaz intergalactique, des processus pas nécessairement symétriques. Le centre de la Galaxie pourrait être décalé par rapport au centre de la matière noire, car cette dernière se comporte différemment du gaz et des étoiles.

Une façon de vérifier cette idée consiste à étudier les longs et fins chapelets d'étoiles qui s'étirent à travers les confins de la Galaxie. Ces «courants» sont les restes d'anciennes galaxies satellites déchiquetées. Le type de galaxie le plus commun que l'on rencontre en orbite autour de la Voie lactée est la «naine sphéroïdale», ainsi nommée en raison de sa forme arrondie et de sa faible masse d'étoiles (typiquement un dix-millième de celle de la Voie lactée). Avec le temps, l'orbite d'une galaxie satellite se resserre et elle

devient sujette aux forces de marée exercées par la Voie lactée. La galaxie naine est alors étirée et peut finir par être réduite à un fin ruban.

Ces courants d'étoiles tournent autour de la Galaxie à très grande distance, là où les effets gravitationnels de la matière noire sont importants, de sorte que leur forme nous renseigne sur celle du halo de matière noire. Si le halo n'est pas parfaitement sphérique, mais un peu aplati, il va exercer un couple sur les étoiles du courant et provoquer une déviation marquée de leur orbite par rapport à une ellipse. Or les courants d'étoiles observés sont très fins et leurs orbites décrivent quasiment des grands cercles. Des simulations menées par Rodrigo Ibata, de l'Observatoire de Strasbourg, et ses collègues suggèrent ainsi que la distribution de matière noire est sphérique en première approximation, même si elle peut présenter une asymétrie compatible avec ce que suggèrent K. Saha et ses collègues.

Si la destruction des galaxies naines pose question, il en est de même de leur formation. Dans les modèles actuels, les galaxies sont au départ des agglomérats de matière noire, qui vont ensuite accrêter du gaz et des étoiles pour former la partie visible. Ce processus crée non seulement une grosse galaxie comme la nôtre, mais aussi une multitude de galaxies

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Chakrabarti, F. Bigiel, P. Chang et L. Blitz, **Finding dark galaxies from their tidal imprints**, soumis à *Astrophysical Journal*. <http://arxiv.org/abs/1101.0815>

J. Geach, **Les galaxies perdues**, *Pour la Science* n° 404, juin 2011. http://bit.ly/404_galaxies_perdues

R. Ibata et B. Gibson, **Le spectre des galaxies défunes**, *Dossier Pour la Science* n° 56, juillet-septembre 2007. http://bit.ly/galaxies_defunes

E. Levine, L. Blitz et C. Heiles, **The vertical structure of the outer milky way H I disk**, *Astrophysical Journal*, vol. 643, n° 2, pp. 881-896, 1^{er} juin 2006. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0601697>

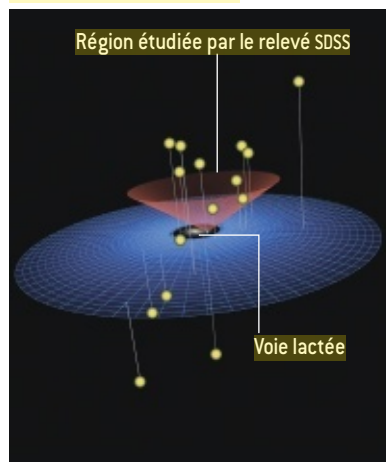
M. Weinberg et L. Blitz, **A Magellanic origin for the warp of the Galaxy**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 641, n° 1, pp. L33-L36 ; 10 avril 2006.

B. Famaey et al., **Local-Group tests of dark-matter concordance cosmology. Towards a new paradigm for structure formation ?**, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 523, id. A32, 2010. <http://arxiv.org/abs/1006.1647>

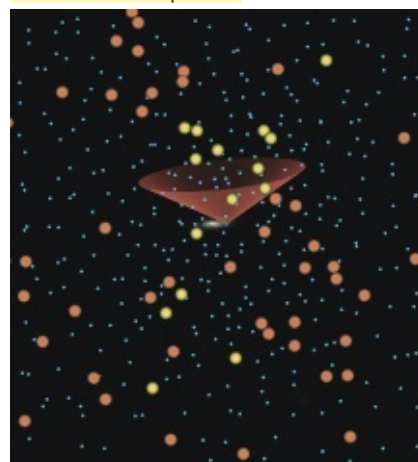
LES SATELLITES MANQUANTS

Les simulations prédisent que la Voie lactée devrait posséder des centaines de petites galaxies satellites, mais on n'en avait jusqu'ici découvert qu'une vingtaine. Le grand relevé *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) a comblé une partie de ce manque en repérant des galaxies satellites, invisibles auparavant. Et pour cause : elles sont composées presque exclusivement de matière noire.

Galaxies satellites connues



Galaxies satellites prédites



- Satellites connus
- Autres satellites peu brillants prédits
- Galaxies formées presque uniquement de matière noire

Don Dixon/L. Bullock, Univ. de Californie

Le disque de satellites de la Voie lactée

Bien que la matière noire soit la réponse à une large gamme de questions en astronomie, certains problèmes résistent encore à une interprétation simple dans le cadre des modèles où elle est prise en compte. Le problème posé par la distribution des galaxies satellites de la Voie lactée est de ceux-là. Jusqu'aux récentes découvertes des nouvelles galaxies satellites ultrafaibles par le relevé SDSS, les astronomes s'étaient focalisés sur leur nombre, particulièrement faible par rapport aux prédictions des modèles. Maintenant que ce problème est en passe d'être résolu, comme l'explique Leo Blitz, nous avons récemment mis en évidence deux problèmes encore plus troublants.

Le premier est la distribution de masse de ces satellites, et en particulier le fait que les plus massifs prédits par les modèles sont absents.

D'après ces modèles, des sous-halos de matière noire très massifs existent en effet autour de la Voie lactée. Il faut donc expliquer pourquoi ces sous-halos ne forment pas d'étoiles, et par conséquent de galaxies satellites visibles, en leur sein. Une autre possibilité est que notre Galaxie soit une anomalie statistique, hypothèse encore moins satisfaisante.

Le second problème, encore plus intrigant, est celui de la distribution spatiale de ces galaxies satellites. Celles-ci sont réparties dans un disque perpendiculaire au disque principal de la Voie lactée. Bien qu'un cinquième seulement du ciel ait été observé par le relevé SDSS, cette distribution en disque des galaxies satellites observées est déjà statistiquement significative. Ce résultat est en contradiction avec les modèles qui pré-

disent une distribution quasi sphérique des galaxies satellites autour de la Voie lactée.

Si cette distribution se confirme, une explication pourrait être que ces galaxies satellites ont été récemment accrétées par la Voie lactée le long d'un seul et même filament de matière noire intergalactique (de telles structures, prédites par les modèles fondés sur la matière noire froide, se croisent en général au niveau des galaxies). Cependant, le disque qui en résulterait serait alors beaucoup plus épais que le disque observé.

Une autre solution serait que ces galaxies satellites ont été créées lors d'une collision avec une autre galaxie, faisant alors de la Voie lactée une réelle descendante d'une galaxie à anneau polaire (possédant un disque principal et un an-

neau perpendiculaire, comme NGC 4650A). Cependant, ces galaxies satellites, non primordiales, seraient alors dépourvues de halo de matière noire, car formées à partir de la matière visible en rotation dans l'anneau polaire. Cette seconde hypothèse réintroduirait notre premier problème : où sont les halos de matière noire et pourquoi ne forment-ils pas d'étoiles ?

Quoi qu'il en soit, il faudra attendre un relevé plus complet du ciel que le SDSS, notamment le prochain relevé *Pan-Starrs*, pour confirmer – ou infirmer – l'existence de ce disque de satellites, totalement inexpliquée par les modèles actuels. Si elle s'avérait, il faudra alors peut-être réviser nos modèles de la Voie lactée.

Benoît Famaey,
chargé de recherche CNRS,
Observatoire de Strasbourg

naines. Les modèles reproduisent assez bien les propriétés de ces dernières, mais en prédisent beaucoup plus que ce qu'on observe ! Les modèles sont-ils faux, ou les observations sont-elles incomplètes ?

Les nouvelles analyses des données du *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), un vaste relevé systématique d'un quart de la voûte céleste, apportent un élément de réponse. Elles ont révélé l'existence d'une dizaine de nouvelles galaxies très peu lumineuses en orbite autour de la Voie lactée. Le ciel est scruté en détail depuis si longtemps qu'il est difficile d'imaginer comment des galaxies situées dans notre voisinage ont pu échapper si longtemps à nos regards. C'est que ces galaxies, qualifiées de « naines ultrafaibles », ne contiennent parfois que quelques centaines d'étoiles ! Elles sont tellement pâles et diffuses qu'elles n'apparaissent pas sur les images classiques : des techniques de traitement du signal sont nécessaires pour les révéler.

Si le relevé SDSS avait couvert le ciel entier, il aurait sans doute découvert environ 35 galaxies naines ultrafaibles de plus. Mais même alors, le compte n'y serait pas : il manque encore plusieurs centaines de galaxies naines par rapport aux prédictions des modèles.

Peut-être ces « galaxies manquantes » sont-elles trop éloignées pour que les

télescopes actuels puissent les détecter ? SDSS peut dénicher des naines ultrafaibles jusqu'à 150 000 années-lumière environ. Erik Tollerud et ses collègues de l'Université de Californie à Irvine prédisent ainsi qu'il existe quelque 500 galaxies encore non découvertes en orbite autour de la Voie lactée, situées dans un rayon de un million d'années-lumière à partir du centre. Si c'est le cas, on devrait les trouver avec un nouvel instrument, le *Large Synoptic Survey Telescope*, qui aura une surface collectrice de lumière huit fois plus grande que celle du télescope de SDSS. Sa construction a démarré en mars dernier.

L'empreinte des galaxies manquantes

Une autre hypothèse est que la Voie lactée posséderait des satellites encore plus sombres que les plus pâles des naines ultrafaibles. Ces galaxies seraient tellement sombres qu'elles n'abriteraient aucune étoile, et seraient composées presque exclusivement de matière noire. Ces galaxies ne pourront être détectées un jour que si elles contiennent un peu de gaz. Celui-ci serait trop diffus pour que s'y forment des étoiles, mais pourrait néanmoins être observé par les grands relevés en ondes radio.

En revanche, si ces galaxies étaient entièrement dépourvues de gaz, elles ne révéleraient leur présence qu'indirectement à travers leurs effets gravitationnels sur la matière ordinaire. Si l'une de ces « galaxies noires » traversait le disque de la Voie lactée, elle laisserait une empreinte comparable à celle d'un caillou jeté à la surface d'un lac, observable sous forme de perturbations dans la distribution ou les vitesses des étoiles et du gaz. Cette perturbation serait néanmoins minime, et il faudrait s'assurer qu'elle ne provient pas d'une autre cause. Une tâche délicate : toutes les galaxies spirales montrent de petites fluctuations dans leurs disques de gaz.

Une collision avec une galaxie noire suffisamment massive pourrait être détectée grâce à une méthode que nous avons mise au point avec Sukanya Chakrabarti, maintenant à l'Université de Floride, et d'autres collègues. Nous avons en effet récemment montré que les perturbations les plus importantes à la périphérie des galaxies sont souvent des empreintes de marées laissées par le passage de galaxies, qui peuvent être différenciées d'autres perturbations. En analysant ces perturbations, nous pouvons déduire à la fois la masse et la position actuelle de la galaxie intruse. Cette technique permet de localiser des galaxies dont la masse ne

dépasse pas un millième de celle de la galaxie principale. En appliquant cette méthode à la Voie lactée, notre équipe a conjecturé qu'une galaxie non encore découverte, et peut-être sombre, se tapit dans le plan même de la Voie lactée, à environ 300 000 années-lumière du centre galactique. Des projets sont maintenant en cours pour observer cette galaxie dans le proche infrarouge à l'aide du télescope spatial *Spitzer*.

Trop peu de lumière

Outre le défi que représente leur recherche, les galaxies ultrafaibles et sombres du voisinage de la Voie lactée posent le problème de la quantité de matière qu'elles contiennent. La quantité de matière d'une galaxie est habituellement mesurée par le rapport entre la masse totale de la matière et la quantité de lumière qu'elle émet. Par définition, le Soleil a un rapport masse-luminosité égal à un. Dans la Galaxie, l'étoile moyenne est un peu moins

massive et beaucoup moins brillante que le Soleil, si bien que le rapport masse-luminosité de la matière classique est proche de trois. Cependant, si l'on inclut la matière noire, le rapport masse-luminosité total de la Voie lactée s'approche de 30.

Josh Simon, maintenant à l'Institut Carnegie de Washington, et Martha Geha, maintenant à l'Université Yale, ont mesuré les vitesses des étoiles de huit galaxies naines ultrafaibles pour déterminer la masse de ces galaxies et la comparer à leur luminosité : le rapport masse-luminosité dépasse 1 000 dans certains cas ! Ce sont de loin les valeurs les plus élevées de toutes les structures connues dans l'Univers. En analysant les fluctuations de température dans le fond diffus cosmologique, on estime le rapport masse-luminosité de l'Univers dans son ensemble à quasiment cinq. Pourquoi le rapport masse-luminosité de la Voie lactée est-il plus élevé, et celui des galaxies ultrafaibles encore plus ?

Cette différence pourrait s'expliquer si les galaxies ayant des rapports masse-

luminosité plus élevés que la moyenne ont en réalité plus de masse que prévu, ou émettent moins de lumière. Les astronomes pensent que c'est ce dernier facteur qui est en cause. Une grande quantité de matière ordinaire ne rayonne pas assez pour être vue, soit parce qu'elle n'a jamais pu se fixer dans des galaxies et se transformer en étoiles, soit parce qu'elle a été éjectée dans l'espace intergalactique, où elle réside sous une forme ionisée, indétectable par les télescopes actuels. Les galaxies de moindre masse, ayant une gravité plus faible, perdent davantage de gaz, si bien que leur émission lumineuse est réduite de façon disproportionnée.

Il est quelque peu ironique que les problèmes posés par la matière invisible (la matière noire) fassent apparaître ceux liés à la matière ordinaire, mais non détectée ! Quelle que soit en fin de compte sa nature, l'existence de la matière noire n'est pas un problème, mais une réponse à une large gamme de questions en astronomie. ■



france culture

VOYAGER DANS LE TEMPS

La marche des sciences
Aurélie Luneau
14h/15h - jeudi
En partenariat avec *Pour la Science*

franceculture.fr

Photo : Marc Donaghy © Philippe Hennebert, Courtesy Glenn Tegen - KOCOS, Paris 2011