



Pour réagir aux articles : courrier@pouirlascience.fr
ou directement sur les pages correspondantes du site www.pouirlascience.fr

✓ OSCILLATIONS ET ÉJECTION

Dans l'article *L'astérosismologie : voir battre le cœur des étoiles* (*Pour la Science* n° 409, novembre 2011, http://bit.ly/409_asterosismologie), l'éjection de matière par certaines étoiles n'est pas évoquée. Ce phénomène peut-il être provoqué ou amplifié par des oscillations de grande amplitude ?
Félicia Berthaud

→ RÉPONSE D'ÉRIC MICHEL

C'est une question que l'on se pose pour divers types d'étoiles, notamment les étoiles massives et les géantes rouges pulsantes de grande amplitude, telle Mira.

Les étoiles Be sont des étoiles massives qui tournent sur elles-mêmes à une vitesse proche du seuil au-delà duquel la matière s'échappe de l'équateur sous l'effet de la force centrifuge. Cette vitesse ne peut cependant expliquer à elle seule leurs épisodes éruptifs. Plusieurs étoiles Be ont été observées par CoRoT. Anne-Laure Huat, de l'Observatoire de Paris, et des collègues, ont pu suivre pour la première fois une éjection en même temps que l'on mesurait les oscillations de l'étoile. L'éruption apparaît corrélée à une diminution d'amplitude des modes de pression au profit des modes de gravité.

De même, une oscillation d'une période de 37 jours a été mise en évidence dans l'étoile supergéante HD50064 (environ 45 masses solaires), dont les variations d'amplitude semblent coïncider avec une perte de masse.

À ce stade, on ne peut cependant en conclure que les interférences constructives des oscillations déclenchent les éjections de matière.

✓ INSAISSABLE PERGÉLISOL

Dans l'article *Le dernier grand réchauffement climatique* (pls 408, octobre 2011, http://bit.ly/408_rechauffement), l'auteur suggère que le dégel du pergélisol pourrait avoir contribué de façon importante au réchauffement climatique de la limite Paléocène-Éocène, il y a 56 millions

d'années. Où y avait-il du pergélisol à cette époque ?
Anne-Laure Legrand

→ RÉPONSE DE FLORENCE QUESNEL

Le pergélisol est un sol gelé en permanence. Au pôle Nord, il ne pouvait pas y en avoir, étant donné la présence d'*Apectodinium* (dinoflagellé des mers tropicales) en quantité dans les couches enregistrant le maximum thermique dans les carottes de l'Arctique, et la présence de fossiles de crocodiles ou de palmiers au voisinage du pôle. Au pôle Sud, les données ne sont pas très nombreuses, mais on a trouvé beaucoup d'*Apectodinium* dans les forages océaniques proches du continent Antarctique et en Nouvelle-Zélande, ainsi que des indices d'océan très chaud. J'ai donc du mal à imaginer la présence de pergélisol en Antarctique à l'époque, à moins que ce ne soit sur de très hauts plateaux. On peut aussi envisager des hauts plateaux en Asie centrale, où il a récemment été montré que le bourrelet de l'Himalaya était déjà en formation durant le Paléocène. Toutefois, ces hypothèses restent à confirmer.

✓ COUP DE CHAUD CONTRE LES VIRUS

Votre article *Tombe-t-on malade quand on prend froid ?* (*Pour la Science* n° 408, octobre 2011, http://bit.ly/408_vraioufaux) ne fait pas état des recherches qui concluent que l'échauffement du corps lors de trajets à vélo peut neutraliser l'incubation des agents pathogènes. Qu'en est-il ?
L. Watine

→ RÉPONSE DE LUC DE SAINT-MARTIN

L'hyperthermie est à la fois la conséquence d'une infection, qui agit sur la régulation de la température au niveau de l'hypothalamus, et un mécanisme de protection contre l'infection, par augmentation du métabolisme cellulaire. Toutefois, cette protection nécessite une certaine durée pour être efficace.

Dans le cadre d'un effort physique, le corps cherche à maintenir sa température à 37°C et, sauf

état pathologique particulier ou conditions extrêmes, il y parvient. Le corps ne se trouve ainsi jamais plus de quelques minutes en hyperthermie vraie.

Il est donc improbable que la pratique du cyclisme ait un effet direct sur l'incubation des pathogènes. Cependant, l'effort, en lui-même, accélère le métabolisme cellulaire, augmente le travail cardiaque, et améliore le drainage bronchique, ce qui est favorable à la lutte contre l'infection.

✓ RAISONNEMENT PANGLOSSIEN

Je suis surpris de trouver autant de légèreté dans l'argumentation de l'article *Seuls dans l'univers ?* (*Pour la Science* 408, octobre 2011, http://bit.ly/408_extraterrestres).

La plupart des arguments de Howard Smith sont de type panglossien : tout attribut terrestre est supposé nécessaire à la vie, qu'il soit régularisant (comme l'orbite circulaire) ou dynamique (comme l'alternance des saisons, ou la tectonique). Ainsi l'auteur suppose-t-il implicitement une vie en surface et donc une atmosphère, alors que la vie sur Terre a commencé sous l'eau et y existe toujours. Le rôle de l'ensoleillement devrait également être relativisé par la découverte des biotopes dans les grands fonds océaniques. La notion de « zone habitable » fait de l'eau liquide en surface un prérequis, alors que Europe et Titan, hors de cette zone, pourraient abriter un océan liquide sous une épaisse calotte de glace. Plus surprenant encore, l'auteur affirme que l'obliquité de la Terre serait défavorable si elle était différente. En quoi une obliquité nulle serait-elle non viable ? Et même si c'était vrai en surface, qu'en est-il des océans ? De la même façon, toute ellipticité est jugée rédhibitoire sans plus de détails. Dans le domaine de la biologie, là aussi, il faudrait suivre scrupuleusement les étapes menant du poisson au mammifère, puis au bipède terrestre intelligent...

Bref, si l'on décide au départ que la vie ne peut exister que sous une forme identique à la nôtre, sur une planète identique à la nôtre, et que tous les paramètres de l'histoire terrestre sont optimaux, on crée effectivement de toutes pièces les conditions de notre « solitude dans l'Univers ».
Fabrice Neyret, Observatoire Zététique



La matière noire est l'une des plus grandes énigmes astronomiques.
Mais pour expliquer certaines caractéristiques de la Voie lactée
et de ses satellites, c'est aussi un élément de réponse.

Le côté obscur de la





Don Dixon

L'ESSENTIEL

✓ La nature de la matière noire, invisible mais qui représente les trois quarts de la matière dans l'Univers, est l'une des plus grandes énigmes de la cosmologie.

✓ Cependant, son existence explique de nombreux mystères astronomiques. Le disque externe de la Voie lactée est par exemple déformé. Cette déformation pourrait résulter d'une amplification par la matière noire de l'effet gravitationnel des galaxies satellites les plus massives.

✓ La matière noire explique aussi le faible nombre de galaxies satellites connues par rapport aux prédictions des modèles. Nombre d'entre elles seraient en fait principalement formées de matière noire, et donc difficiles à détecter.

VOIE LACTÉE

Leo Blitz



1. LE DISQUE DE LA VOIE LACTÉE présente un gauchissement. Il s'agirait d'une déformation dynamique, semblable à la vibration d'une peau de tambour, dont la période est de quelques centaines de millions d'années (*de gauche à droite et de haut en bas*). Cette ondulation serait engendrée par des perturbations au sein de la distribution de matière noire de la Galaxie, elles-mêmes provoquées par le mouvement de galaxies satellites (*taches bleues pâles*).

Les astronomes ont mis du temps à se rendre compte de l'importance de la matière noire. Pour ma part, j'en fus convaincu dès mon premier projet en tant que postdoctorant à l'Université de Californie à Berkeley, en 1978. Je mesurais la vitesse des nuages moléculaires géants – où se forment les étoiles – dans les régions externes de la Voie lactée, avec une méthode que j'avais mise au point et qui était alors la plus précise. Deux spécialistes de la Voie lactée, Frank Shu et Ivan King, étaient présents lorsque j'ai commencé à reporter sur un graphique les vitesses de rotation autour du centre galactique des nuages les plus éloignés. Ces vitesses mettaient en évidence que la Voie lactée regorge de matière noire, en particulier vers l'extérieur. Perplexes, nous avons essayé d'imaginer quelle était la nature de cette matière noire. Toutes nos idées se sont rapidement révélées fausses.

Cette étude et de nombreuses autres dans les années 1970 et 1980 ont obligé les astronomes à admettre que non seulement la matière noire, une substance mystérieuse qui n'émet pas de lumière, n'interagit pas avec cette dernière et ne se trahit que par son influence gravitationnelle, existe bel et bien, mais qu'en plus elle est largement dominante dans l'Univers. Les mesures du fond diffus cosmologique indiquent que la matière noire représente cinq fois plus de masse que la matière ordinaire, ou baryonique (protons, neutrons, électrons, etc.). Cependant, on ne sait toujours pas quelle est la nature de cette substance. Disons simplement que, d'après l'hypothèse la plus prudente, la matière noire est formée de particules exotiques qui n'ont pas encore été détectées dans les accélérateurs, prédites par des théories n'ayant pas encore été vérifiées. L'hypothèse la plus radicale est que la théorie de la gravitation de Newton comme la théorie de la relativité d'Einstein seraient fausses, ou tout au moins nécessiteraient des corrections majeures.

Quelle que soit sa nature, la matière noire apporte néanmoins des clés pour résoudre des énigmes concernant certaines caractéristiques de la Voie lactée. On sait par exemple depuis plus de 50 ans que les régions externes de la galaxie sont gauchies, comme un disque en vinyle oublié sur un radiateur. Les astronomes ne parvenaient pas à élaborer de modèle satisfaisant pour expliquer ce gauchissement, jusqu'à ce qu'ils prennent en compte les effets de la

matière noire. De même, les simulations numériques de la formation des galaxies s'appuyant sur les propriétés supposées de la matière noire prédisent que notre Galaxie devrait être entourée de centaines, voire de milliers, de petites galaxies satellites. Mais les observateurs n'en voyaient qu'une vingtaine. Or plusieurs équipes ont récemment découvert quantité de galaxies naines satellites, ce qui réduit le désaccord avec les simulations. Ces nouveaux satellites contribuent non seulement à résoudre un mystère de longue date concernant la structure galactique, mais ils pourraient nous révéler des informations sur l'inventaire total de la matière cosmique.

Un 33 tours oublié sur un radiateur

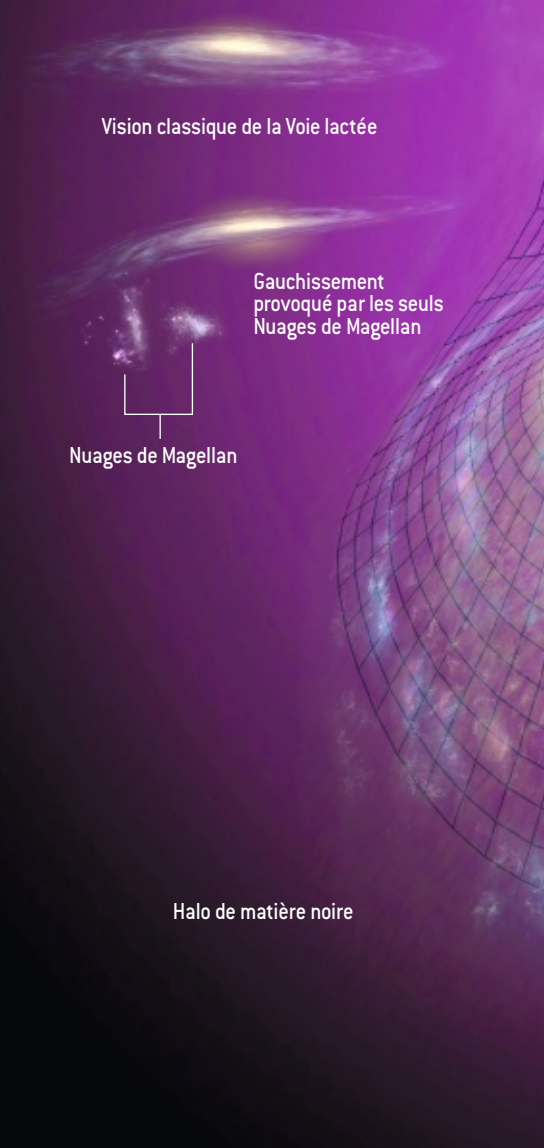
Pour comprendre ce que la matière noire nous dit sur la Voie lactée, une première étape consiste à dresser un tableau général de l'organisation de la Galaxie. La matière ordinaire (les étoiles et le gaz) se trouve regroupée au sein de quatre structures majeures : un disque mince (qui inclut les bras spiraux, et incidemment le Soleil), un noyau dense (qui abrite un trou noir supermassif), un bulbe allongé que l'on nomme la « barre », et un « halo » grossièrement sphérique de vieilles étoiles et d'amas stellaires qui enveloppe le reste de la Galaxie. La matière noire a une répartition très différente. Bien que nous ne puissions pas l'observer, nous pouvons le déduire à partir de ses effets gravitationnels sur le matériau visible, et plus précisément sur la vitesse de rotation d'ensemble des étoiles et du gaz. Les vitesses observées suggèrent que la matière noire est distribuée de façon à peu près sphérique et s'étend bien au-delà du halo stellaire, avec une densité qui est maximale au centre et décroît approximativement comme le carré de la distance. Une telle distribution serait le résultat naturel de la « fusion hiérarchique », hypothèse selon laquelle dans l'enfance de l'Univers, les petites galaxies se sont accrétées pour en former de plus grosses, comme la Voie lactée.

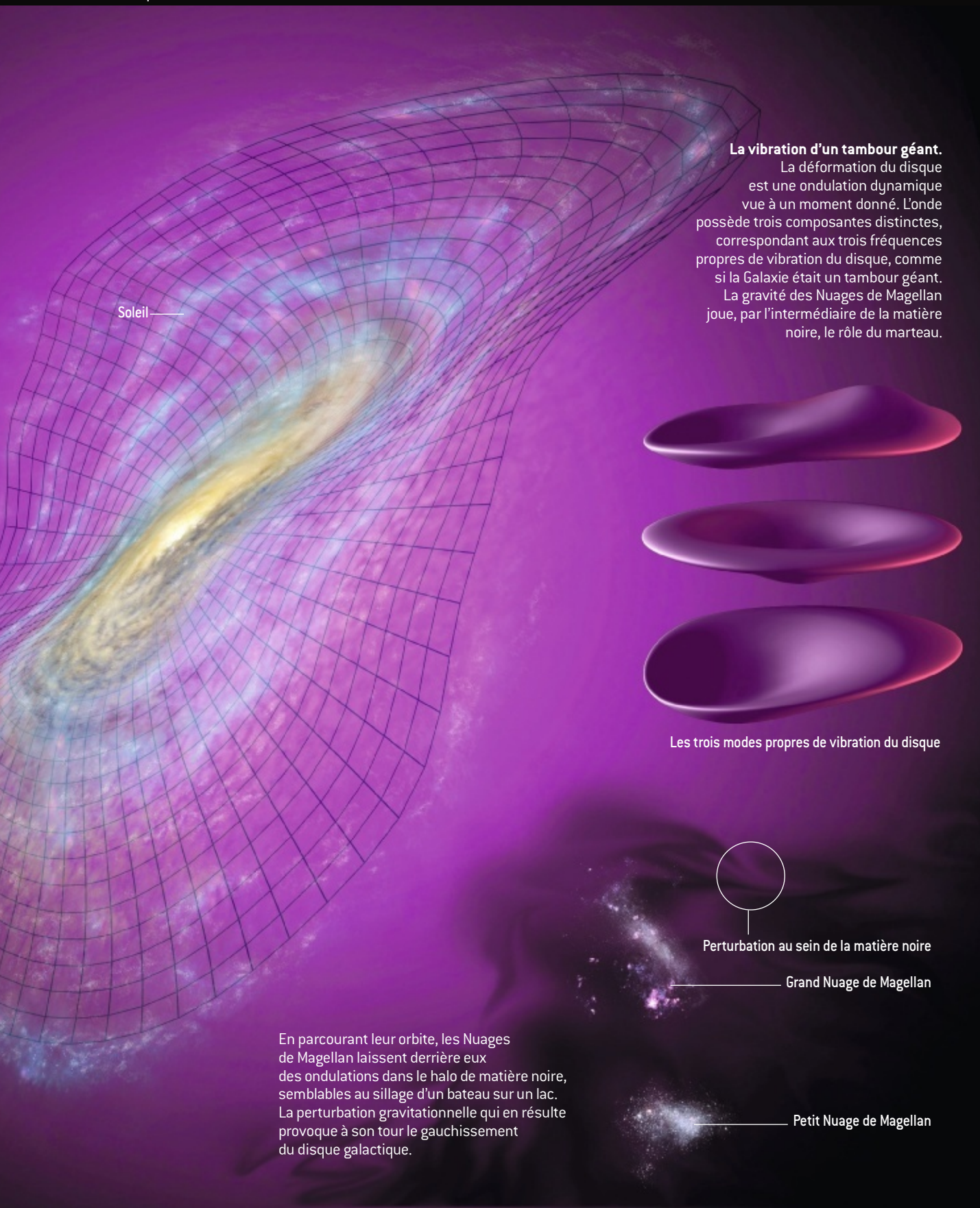
Pendant des années, les astronomes sont restés bloqués sur ce tableau grossier de la répartition de la matière noire : une gigantesque boule non différenciée de matière inconnue. Plus récemment, cependant, nous avons réussi à collecter plus de détails, et la matière noire s'est révélée être

Le disque contient l'essentiel des étoiles et du gaz de notre Galaxie. Sa taille et son épaisseur sont proportionnellement proches de celles d'un 33 tours. Ce disque est tordu, un peu comme un 33 tours oublié sur un radiateur.

Une vieille hypothèse revisitée

Une hypothèse datant des années 1950 attribuait le gauchissement du disque à la gravité de deux galaxies satellites, le Grand et le Petit Nuage de Magellan. Elle a été abandonnée, car ces satellites sont trop légers pour avoir des effets notables sur notre Galaxie. Cependant, on sait aujourd'hui que la partie visible de la Voie lactée est plongée dans un énorme halo sphérique de matière noire. Il a été montré que la matière noire peut amplifier l'influence gravitationnelle des Nuages de Magellan, ce qui expliquerait le gauchissement.





Soleil

La vibration d'un tambour géant.

La déformation du disque est une ondulation dynamique vue à un moment donné. L'onde possède trois composantes distinctes, correspondant aux trois fréquences propres de vibration du disque, comme si la Galaxie était un tambour géant. La gravité des Nuages de Magellan joue, par l'intermédiaire de la matière noire, le rôle du marteau.



Les trois modes propres de vibration du disque

Perturbation au sein de la matière noire

Grand Nuage de Magellan

Petit Nuage de Magellan

En parcourant leur orbite, les Nuages de Magellan laissent derrière eux des ondulations dans le halo de matière noire, semblables au sillage d'un bateau sur un lac. La perturbation gravitationnelle qui en résulte provoque à son tour le gauchissement du disque galactique.



Eckhard Starik

2. LE GRAND NUAGE DE MAGELLAN, le plus gros satellite de la Voie lactée, pourrait agiter le halo de matière noire qui baigne notre Galaxie.

✓ SUR LE WEB

Le site du relevé SDSS :
<http://www.sdss.org/>

Une animation de la vibration
du disque galactique :
[www.ScientificAmerican.com/
oct2011/blitz](http://www.ScientificAmerican.com/oct2011/blitz)

L'AUTEUR



Leo BLITZ, professeur d'astronomie, dirige le Laboratoire de radioastronomie de l'Université de Californie à Berkeley.

plus intéressante que ce que l'on avait prévu. Plusieurs faisceaux d'indices suggèrent qu'elle n'est pas distribuée de façon continue, mais présente des grumeaux à grande échelle.

Une telle irrégularité expliquerait le « gauchissement » de la Galaxie, une distorsion spécifique que présente la périphérie du disque galactique. À des distances supérieures à environ 50 000 années-lumière du centre, le disque est presque entièrement constitué d'hydrogène sous forme atomique, et ne comporte que peu d'étoiles. La cartographie de ce gaz à l'aide de radiotélescopes révèle qu'il s'écarte du plan de la Galaxie, écart d'autant plus marqué que l'on va vers l'extérieur. À 75 000 années-lumière, le disque se situe 7 500 années-lumière hors du plan galactique, soit en dessous, soit au-dessus. En d'autres termes, vue de profil, la Galaxie ressemble à un S à l'horizontal.

Tout en tournant autour du centre galactique, le disque oscille en fait de haut en bas, passant au-dessus, puis au-dessous du plan. Cette oscillation se déroule sur des centaines de millions d'années et nous la voyons à un moment donné de son cycle.

Le disque de gaz se comporte un peu comme un tambour géant qui vibre au ralenti. À l'instar du tambour, il peut vibrer selon de multiples fréquences, correspondant chacune à une certaine déformation de la surface. En 2005, avec mes collègues, nous avons montré que le gauchissement observé est la somme de trois de

ces fréquences. La résultante est asymétrique : le gaz situé d'un côté de la Galaxie est beaucoup plus éloigné du plan de la Galaxie que le gaz situé à l'opposé.

Les radioastronomes qui ont les premiers remarqué le gauchissement dans les années 1950 ont pensé qu'il pouvait résulter de l'influence gravitationnelle des Nuages de Magellan, les deux galaxies satellites de la Voie lactée les plus massives. En effet, leur orbite étant hors du plan de la Voie lactée, leur gravité tend à déformer le disque. Mais des calculs détaillés ont montré que ces forces de marée sont trop faibles pour expliquer le gauchissement : les Nuages de Magellan sont tout simplement trop peu massifs. Pendant des décennies, l'origine du gauchissement est restée un mystère.

Le marteau noir du tambour galactique

La prise de conscience que la Voie lactée contient de la matière noire, ainsi que la réestimation à la hausse de la masse des Nuages de Magellan, ont introduit une nouvelle possibilité. Si le disque de gaz joue le rôle de tambour géant, les Nuages de Magellan en orbite au sein du halo de matière noire pourraient jouer – indirectement – celui du marteau qui fait résonner le tambour. Les Nuages créent un sillage dans la matière noire, de la même façon qu'un train d'ondes se forme derrière un bateau qui fend l'eau. Le mouvement du nuage crée ainsi des irrégularités dans la distribution de matière noire ; irrégularités qui font osciller les régions externes du disque, de faible masse. Par conséquent, bien que les Nuages de Magellan soient minuscules, la matière noire amplifie leurs effets.

Martin Weinberg, de l'Université du Massachusetts à Amherst, a avancé cette idée en 1998. Tous les deux, nous l'avons ensuite appliquée à des observations de la Voie lactée, et nous avons montré que nous parvenions à reproduire les trois modes de vibration du disque de gaz. Si notre théorie est correcte, le gauchissement est une caractéristique dynamique de la Voie lactée, et change continuellement avec le déplacement des Nuages de Magellan. La forme de la Galaxie n'est pas fixe, mais en perpétuelle évolution.

Le gauchissement n'est pas la seule asymétrie qui affecte la forme de la Voie lactée. Une des plus remarquables est celle

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. Gibso, **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>

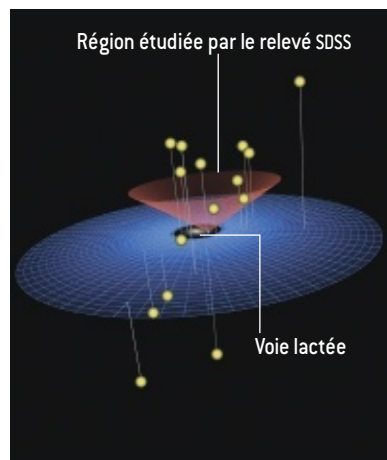
M. Weinberg et L. Blitz, **A Magellanic origin for the warp of the Galaxy**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 641, n° 1, pp. L33-L36 ; 10 avril 2006.

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>

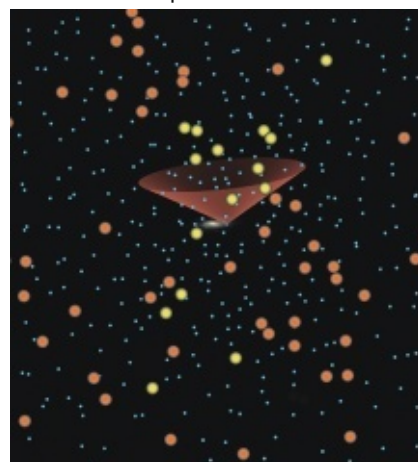
LES SATELLITES MANQUANTS

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 inexplicable 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 tapis 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 Hamelin. Couverture: Jeanne Lippard. © 2011



Minéralogie

La forêt des cristaux géants

Giovanni Badino et Paolo Forti



Dans une mine du Nord du Mexique, une série de grottes abrite les plus grands cristaux de gypse du monde.

Leur étude est en cours, avant qu'ils ne disparaissent à jamais...

Dans le désert de Chihuahua, au Nord du Mexique, le village de Naica s'est développé autour de l'une des plus grandes mines d'argent au monde. En 1910, cette mine est devenue célèbre, car les travaux d'excavation ont mis au jour, 130 mètres sous le niveau de l'entrée de la mine (située à 1385 mètres d'altitude) la « Grottes des épées » (*Cueva de las Espadas*), une cavité qui renfermait des cristaux de gypse atteignant deux mètres de hauteur, parmi les plus grands jamais découverts (les plus grands étant alors ceux de Mazan, dans le Vaucluse, atteignant 2,50 mètres). Cette grotte a malheureusement été presque entièrement pillée et ses cristaux sont aujourd'hui exposés dans les plus grands musées minéralogiques du monde.

Après la Seconde Guerre mondiale, l'activité minière s'est intensifiée et a atteint l'aquifère thermal sous-jacent, à 130 mètres de profondeur. Pour permettre aux mineurs de travailler, d'énormes pompes ont été installées. À l'heure actuelle, les pompes évacuent toujours du fond de la mine plus d'un mètre cube par seconde d'eau à 54 °C, et le niveau de l'aquifère a baissé de 700 mètres environ.

En 2000, à 290 mètres de profondeur, on découvrit trois autres grottes, ressemblant à d'énormes géodes, qui abritent des cristaux de gypse incroyables. Dans la plus grande d'entre elles, nommée Grotte aux cristaux (*Cueva de los cristales*), se trouve une forêt de cristaux aux dimensions gigantesques : la plupart d'entre eux mesurent quatre à six mètres, et le plus grand cristal atteint 11 mètres ! Les autorités condamnèrent immédiatement les grottes avec des grilles pour empêcher tout pillage.

Entre 2001 et 2005, des visites ponctuelles furent organisées, mais il apparut rapidement qu'il était

impossible d'explorer et d'étudier efficacement les grottes de Naica de cette façon, en raison des conditions environnementales extrêmes. La température, notamment dans la Grotte aux cristaux, y atteint 46 °C. En effet, si la température augmente toujours avec la profondeur, les grottes de Naica se situent dans une ancienne zone volcanique, de sorte que la température augmente plus vite qu'ail-

leurs avec la profondeur. De surcroît, l'humidité relative y est proche de 100 pour cent. Dans ces conditions, le corps ne peut refroidir par évaporation de la sueur. La peau se réchauffe jusqu'à la brûlure. En outre, après à peine cinq minutes, inspirer l'air brûlant et humide devient un calvaire, et les poumons sont rapidement saturés en eau, tandis que le cœur travaille plus fort.

On peut quantifier l'hostilité de cet environnement par l'indice humidex, qui tient compte de la température et de l'humidité. Le corps humain souffre lorsque cet indice dépasse 35, et au-delà de 55, le danger est réel. Les grottes de Naica ont des index humidex compris entre 95 et 105. Elles sont donc très dangereuses ! *A posteriori*, maintenant que nous en savons plus sur ce milieu, nous sommes heureux d'en être sortis vivants à chaque fois !

En 2006, pour mener des recherches sur ces grottes, la Société *Peñoles*, propriétaire de la mine, la Société de production audiovisuelle mexicaine *C/Producciones* et l'Association italienne d'exploration géographique

La Venta ont mis sur pied le Projet Naica. La première action a été d'organiser un suivi médical en temps réel des explorateurs et des chercheurs. Nous nous sommes attachés ensuite à mettre au point des combinaisons et des respirateurs spéciaux pour permettre un séjour prolongé à l'intérieur de la grotte.

L'ESSENTIEL

✓ En 2000, dans la mine de Naica, au Mexique, trois grottes abritant des cristaux de gypse géants ont été mises au jour. L'une contient des cristaux allant jusqu'à 11 mètres, sans doute les plus grands du monde.

✓ L'humidité et la température extrêmes qui y règnent rendent l'exploration de ces grottes difficile.

✓ Plusieurs expéditions ont cependant permis d'étudier ces cristaux géants.

✓ Ils seront engloutis à brève échéance par la remontée des eaux si rien n'est fait.