



1. GEPI, Observatoire de Paris-PSL, CNRS
2. Aix-Marseille Université, CNRS, CNES, LAM
3. Institut d'astrophysique, université Andres-Bello, Chili

LE DÉCLIN KEPLERIEEN DE LA COURBE DE ROTATION DE LA GALAXIE

Les mesures effectuées avec le satellite *Gaia* permettent de reconstituer avec une précision jamais atteinte auparavant les positions et les vitesses d'un grand nombre d'étoiles du disque de notre Galaxie. La manière dont leur vitesse décroît en fonction de la distance au Centre galactique implique une quantité de matière sombre beaucoup plus faible que ce qui était attendu.

La Voie lactée traverse le ciel des deux hémisphères Nord (à gauche sur la figure ci-dessus) et Sud (à droite), et doit son nom à son apparence « laiteuse ». Apparence qui est due à l'accumulation d'étoiles dans son disque qui ne sont pas résolues par notre œil, comme l'avait déjà conjecturé Démocrite (460-370 av. J.-C.) suivi par d'autres philosophes de l'Antiquité avant que Galilée ne le vérifie avec sa lunette en 1609.

C'est parce que nous faisons partie de la Voie lactée qu'elle sous-tend un angle de près de 360°, c'est-à-dire qu'elle s'étend sur les horizons des deux hémisphères. La Galaxie, le

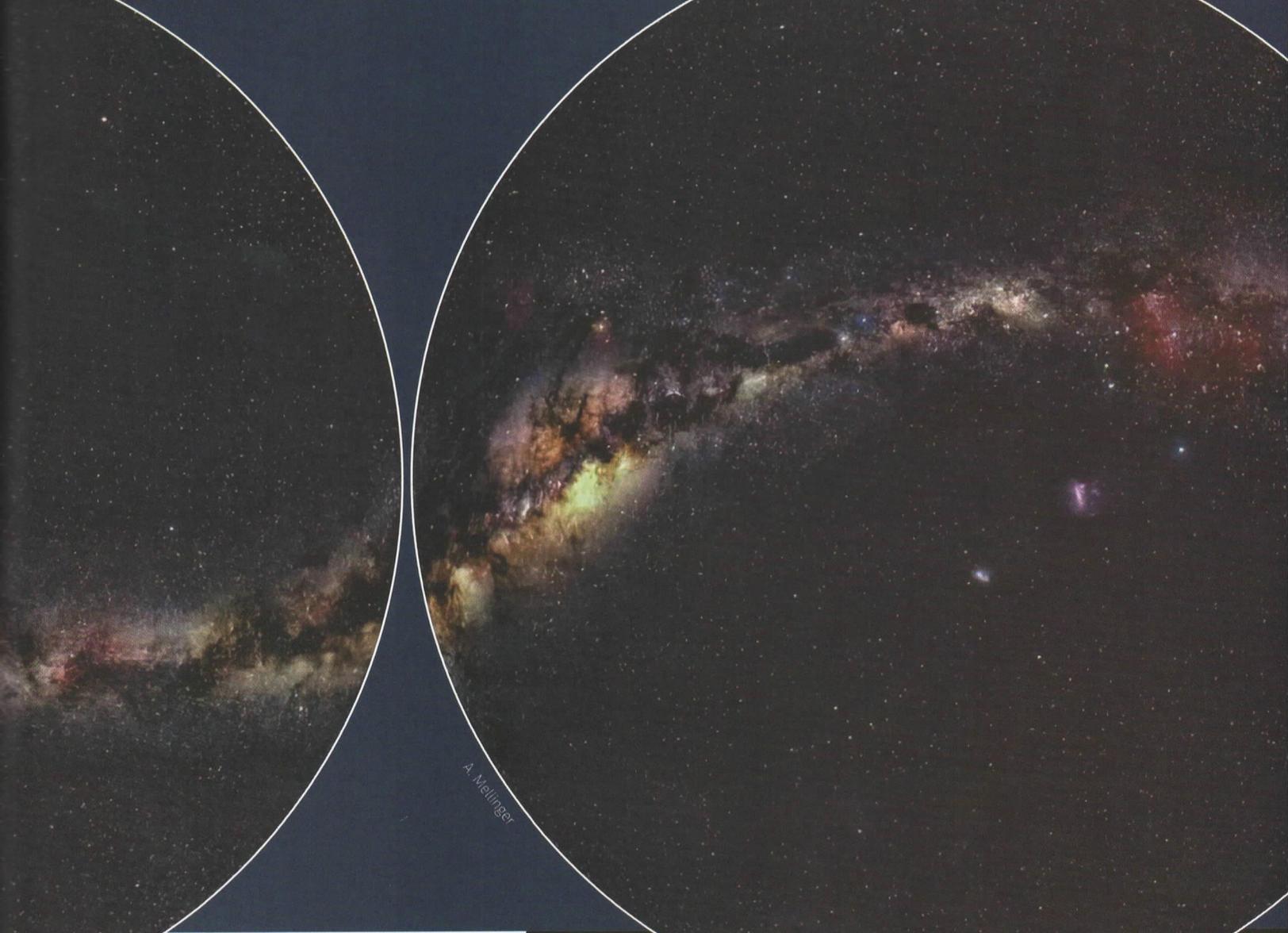
nom scientifique plus communément donné à la Voie lactée, contient plusieurs centaines de milliards d'étoiles, dont notre Soleil. Le nombre d'étoiles pourrait même atteindre un millier de milliards lorsqu'on y intègre des étoiles de masses de plus en plus petites. Elle contient également du gaz et de la poussière, cette dernière obscurcissant la lumière de certaines étoiles du disque et du bulbe.

La Voie lactée est une grande galaxie spirale dont la majorité des étoiles, comme le Soleil, se trouvent dans un immense disque de près de 100 000 années-lumière de diamètre. La partie interne du disque contient aussi une gigantesque barre,

sans doute formée juste après le disque, il y a 8 à 9 milliards d'années. Nous la voyons dans l'image ci-dessus sous la forme d'un renflement que l'on appelle le bulbe.

Dans le disque, les étoiles orbitent de façon quasi circulaire autour du Centre galactique. Par contre, dans le bulbe, une partie des étoiles a des orbites qui peuvent prendre toutes les directions, et une autre partie a des orbites structurées par la barre stellaire. Du point de vue dynamique, on dit que le disque est en équilibre gravitationnel grâce à la rotation des étoiles et du gaz, alors que le bulbe l'est principalement par la dispersion des vitesses de ses étoiles.

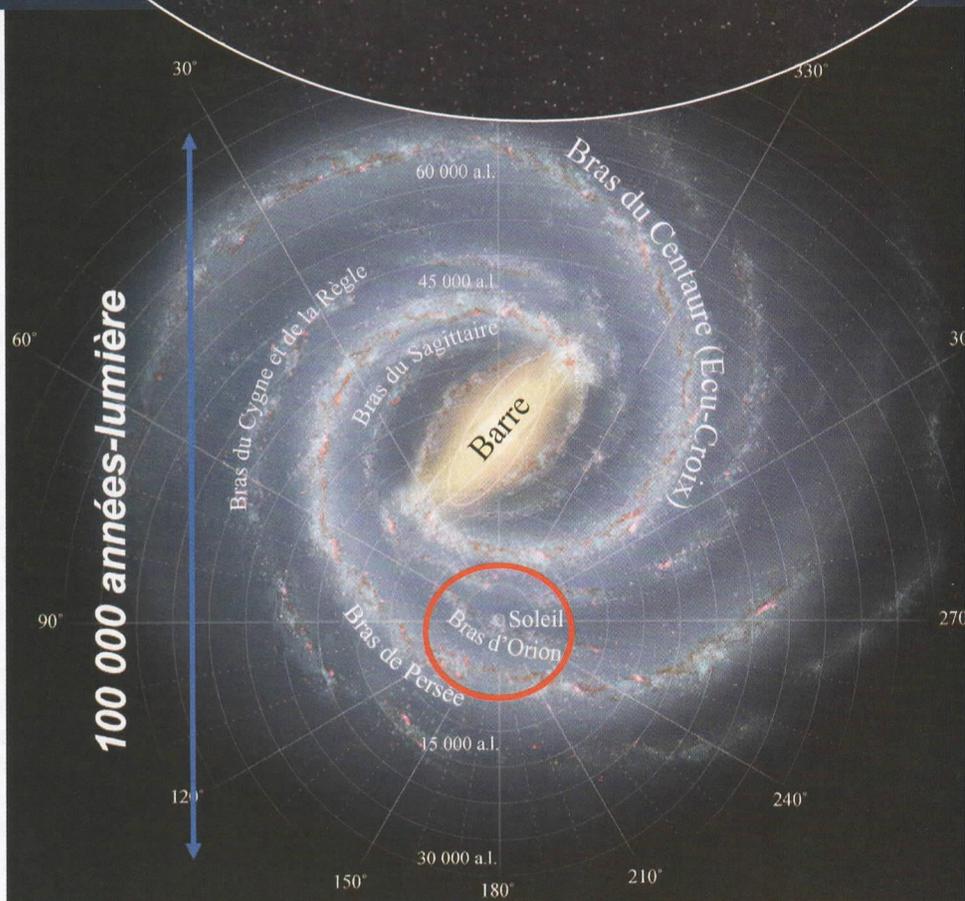




La courbe de rotation de la Galaxie avant Gaia

Lorsque nous les observons, les étoiles du disque en rotation autour du centre de la Galaxie ont des mouvements qui se situent essentiellement dans le plan du ciel. Pourquoi ? Pour le comprendre, examinons d'abord la figure ci-contre.

Celle-ci nous montre la Galaxie vue par la tranche (en haut) et la vision (en bas) que l'on pourrait avoir de notre Galaxie si nous pouvions la voir de face. Cette dernière « image » a été reconstituée grâce aux observations dans l'infrarouge qui sont beaucoup moins affectées par la poussière. La position du Soleil est indiquée, encerclée en rouge. Imaginons maintenant que nous sommes à la position du Soleil et que nous observons les étoiles situées vers le bord du disque, du côté opposé au Centre galactique, c'est-à-dire avec un angle de 180° (vers le bas de l'image). C'est vers la région du disque que l'on appelle communément l'anti-centre. Comme les étoiles de l'anti-centre tournent à l'intérieur du disque, les seuls mouvements possibles sont perpendiculaires à la ligne de visée, c'est-à-dire qu'ils s'inscrivent dans le plan du ciel.





Cela fut un énorme défi pour les astronomes qui voulaient mesurer la rotation du disque de la Galaxie. En effet, la spectroscopie nous permet seulement de mesurer les mouvements le long de la ligne de visée, grâce au décalage Doppler-Fizeau des raies dans les spectres. S'il n'y a pas ou peu de mouvement le long de cette ligne de visée, la détermination des vitesses circulaires des étoiles du disque devient un problème pratiquement insoluble. Comment établir la courbe de rotation qui représente la variation de la vitesse circulaire en fonction du rayon au Centre galactique si on ne peut pas mesurer les mouvements dans le plan du ciel ? De fait, avant *Gaia*, la Galaxie avait une courbe de rotation qui était la moins fiable parmi celles de toutes les galaxies, en particulier celles vues principalement par la tranche.

La meilleure courbe de rotation de la Galaxie

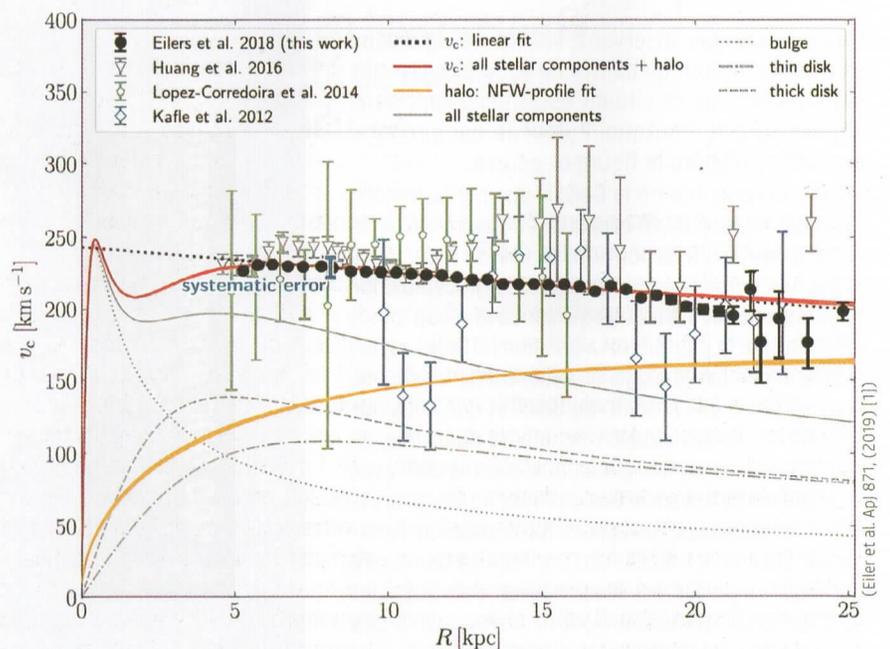
C'est grâce au second catalogue des mouvements propres des étoiles de *Gaia* (« data release », DR2), en 2018, qu'une équipe dirigée par l'astronome Christina Eilers (alors à l'Institut Max-Planck de Heidelberg) a pu établir la courbe de rotation de notre Galaxie [1]. Grâce aux mesures des mouvements propres des étoiles dans le plan du ciel, l'équipe a pu réduire les incertitudes sur les vitesses circulaires des étoiles d'un facteur compris entre 10 et 100 ! Et obtenir ainsi la courbe de rotation la plus précise, par rapport à celles de toutes les autres galaxies.

On ne peut que constater l'immense révolution en précision que les données de *Gaia* DR2 ont apportée grâce à leur précision en comparant les barres d'erreur. À noter aussi que les fluctuations des anciennes courbes de rotation disparaissent, et que la courbe de rotation décline doucement jusqu'à 21 kpc, alors qu'au-delà, les incertitudes deviennent trop grandes.

Cette figure montre différentes courbes de rotation de la Galaxie obtenues ces dix dernières années. Une courbe de rotation indique la vitesse circulaire moyenne des étoiles ou du gaz (en ordonnées) en fonction du rayon galactocentrique (en abscisses). La courbe de rotation de *Gaia* DR2 est indiquée par les cercles pleins et noirs, les autres sont représentées par des symboles creux verts, gris ou bleus.

LA VOIE LACTÉE

La Voie lactée doit son nom à la mythologie grecque. Zeus place Hercule, un de ses fils illégitimes né d'une mère mortelle, sur un sein d'Héra endormie, sa femme légitime, afin qu'Hercule accède à l'immortalité. Héra finit par se réveiller et chasse Hercule qui tète goulûment son sein de toute sa force légendaire, mais Héra réussit difficilement à l'en arracher et une giclée de lait se répandit dans le ciel des hémisphères Nord (à gauche sur la figure p. 24-25) et Sud (à droite sur cette même figure) formant ainsi la Voie lactée. Par ciel clair et sans Lune, elle domine tout le ciel, et a été nommée de nombreuses façons par les mythologies du monde entier : la rivière argentée du paradis en Chine, l'allée des oiseaux (migrateurs) en Finlande, l'abdomen d'un dauphin en Inde, l'œuvre d'Isis qui a semé du blé dans le ciel dans l'Égypte ancienne, de la poussière d'or chez les Incas, de la neige céleste pour les Inuits, un grand fleuve céleste pour les Bédouins rêvant d'eau dans leur désert, le fond d'un ruisseau brouillé par les ébats d'une tortue cosmique pour certains Amérindiens, un long requin bleu mangeur de nuages pour les Polynésiens, la route suivie par Gwydion à la poursuite de sa femme vagabonde pour les Celtes et, bien sûr, le chemin de Saint-Jacques-de-Compostelle pour les pèlerins médiévaux !



(Eilers et al. ApJ 871, (2019) [1])



L'astronome amateur Serge Brunier a observé la Voie lactée depuis plusieurs observatoires terrestres et a pu transformer l'image projetée sur le ciel en ce qui serait une bonne approximation de la morphologie de la Galaxie si nous étions situés à plusieurs centaines de milliers d'années-lumière d'elle. Nous y distinguons le disque proéminent, et au centre, le bulbe dont les étoiles sont partiellement cachées par la poussière, celle-ci formant une gigantesque barrière nous empêchant de distinguer la totalité du bulbe et du disque en lumière visible.

ESO/S. Brunier

Une révolution dans la révolution : Gaia DR3

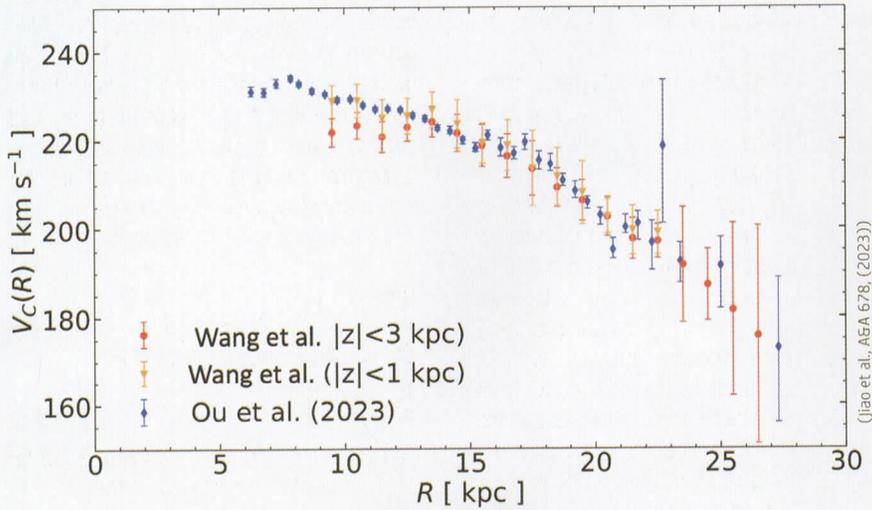
Fin 2020, *Gaia* publiait son nouveau catalogue préliminaire (*Gaia* EDR3) avec des précisions deux fois meilleures que *Gaia* DR2 sur les mouvements propres et sur les vitesses de rotation des étoiles du disque. Cela a été complété en 2022 par la publication des nouvelles vitesses radiales (*Gaia* DR3). Pourquoi des vitesses radiales ? C'est en combinant les mouvements propres des étoiles dans le plan du ciel avec les mouvements dans notre direction qu'on obtient les vitesses dans un espace à 3 dimensions. Grâce aux parallaxes de *Gaia*, on obtient aussi les distances, et donc les positions, en 3 dimensions des étoiles. *Gaia* génère ainsi ce qui est le Graal pour les physiciens : l'espace des phases en 6 dimensions (les 3 coordonnées spatiales et

les 3 des vitesses), qui permettent de calculer les orbites passées et futures des étoiles.

Et si les étoiles du disque sont en équilibre avec le potentiel gravitationnel de la Voie lactée, on peut mesurer la masse de cette dernière ! Prenons notre Soleil en exemple : celui-ci orbite autour du centre de la Galaxie sur une orbite quasi circulaire avec une vitesse de 230 km/s, les mouvements non circulaires étant presque négligeables, de l'ordre de 10 à 12 km/s. Avec un âge respectable de 4,6 milliards d'années, notre Soleil, situé à 8,2 kpc du Centre galactique, a déjà pu effectuer plus de 22 orbites¹. Les dynamiciens considèrent qu'il faut de 3 à 5 orbites révolues pour qu'un satellite soit en équilibre avec la galaxie hôte. Notre Soleil est donc pratiquement en équilibre dans le potentiel gravitationnel de la Galaxie. On peut ainsi déduire la masse de la Galaxie à l'intérieur de l'orbite solaire, qui est de presque 100 milliards de masses

solaires. Ce simple exercice montre qu'il manque de la masse à l'intérieur de cette orbite, puisque la masse ordinaire cumulée, celles des étoiles et du gaz neutre, n'atteint que la moitié de la valeur précédente. Mais qu'en est-il des étoiles situées le plus au bord du disque de la Galaxie ?

Deux équipes ont utilisé les résultats de *Gaia* DR3 pour en déduire les orbites des étoiles situées jusqu'à 27 kpc du Centre galactique. Malgré la différence dans les échantillons d'étoiles utilisés, leurs résultats présentaient un bon accord, les deux études montrant que la vitesse de rotation décroissait de façon significative aux grands rayons. La première équipe, dirigée par l'astronome Haifeng Wang, a pris en compte toutes les étoiles du disque observées par *Gaia*, et a utilisé les mesures de parallaxe de *Gaia* pour en estimer la distance. Cependant, pour une luminosité stellaire donnée, plus la distance augmente, moins la parallaxe devient précise.



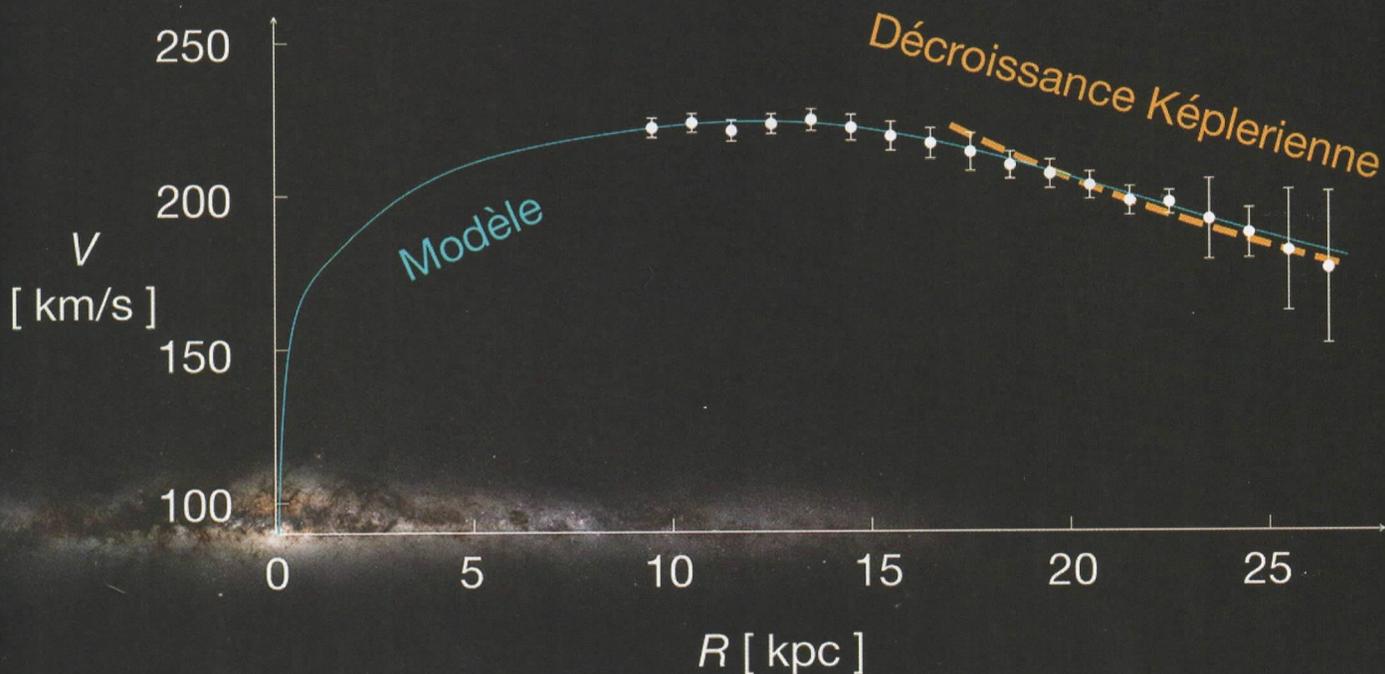
C'est pourquoi la seconde équipe, dirigée par Xiaowei Ou et Christina Eilers, a choisi d'utiliser moins d'étoiles mais plus lumineuses, soit 33 000 étoiles géantes rouges, pour lesquelles on pouvait préciser les mesures de distance grâce à des études spectrophotométriques.

Trouver des résultats similaires avec des méthodes différentes est très rassurant si on veut valider la courbe de rotation de la Galaxie, en particulier aux plus grands rayons. Cependant, il manquait une « touche » très importante, celle de l'analyse des erreurs, et plus particulièrement des erreurs systématiques.

Les erreurs systématiques, qu'est-ce que c'est ? Lorsqu'on étudie la distribution de masse responsable de la rotation des étoiles, on doit résoudre une équation différentielle un peu complexe, appelée équation de Jeans. Celle-ci tient compte non seulement des mouvements de rotation des étoiles, mais aussi des mouvements transverses, qui sont plus faibles certes, mais qui peuvent aussi modifier l'équilibre du disque de la Galaxie. Par ailleurs, on doit aussi supposer une distribution théorique des étoiles dans le disque de la Galaxie, et celle-ci n'est pas parfaitement connue ob-

servationnellement, en particulier pour les étoiles les plus distantes. Finalement, le disque de la Galaxie apparaît un peu gaucho, un peu comme une roue de vélo qui serait voilée et, en plus, il s'épaissit du centre au bord. Cela implique d'observer les étoiles dans différentes épaisseurs du disque (appelées $|z|$ dans la figure ci-contre) et de vérifier les variations de leur rotation, en particulier pour les étoiles plus éloignées du Centre galactique, là où cet effet pourrait devenir important.

C'est ce que nous avons fait dans l'article de Jiao *et al.* [2] publié dans la revue *Astronomy & Astrophysics* fin septembre 2023. Nous avons réévalué toutes les incertitudes possibles, y compris sur les distances des étoiles. Pour être certains de ne pas oublier la moindre source d'incertitude, nous avons séparé les échantillons d'étoiles du disque en deux parties égales, et comparé les différences en vitesse de rotation. Pour estimer ces incertitudes, nous avons accumulé les différentes sources d'incertitudes systématiques, ce qui nous a conduits à les surévaluer, puisque certaines d'entre elles sont redondantes. Cela surestime les incertitudes et par conséquent renforce la validité de la courbe de rotation de notre Galaxie que l'on voit dans la figure ci-dessous.



Les points et leurs barres d'erreur de cette nouvelle courbe de rotation correspondent aux mesures les plus précises des vitesses de rotation des étoiles du disque à différentes distances R du Centre galactique. Sur la courbe de rotation, nous avons superposé l'image de la Galaxie, à l'échelle, dont le rayon externe du disque atteint 17 kpc. On notera que, dans le modèle représenté par la courbe bleue, nous n'avons pas considéré les vitesses des étoiles à l'intérieur d'un rayon de 7 kpc. C'est qu'à ces faibles distances, la rotation des étoiles est perturbée par le bulbe et la barre de la Galaxie, alors que nous sommes intéressés par ce qui se passe au bord du disque. La courbe en pointillé orange représente la décroissance képlérienne de la vitesse de rotation telle qu'elle est prédite par la théorie. On notera l'accord entre les courbes bleue et orange, et les observations à 18 et 27 kpc. La surestimation des barres d'erreur a été remarquée par l'astronome-statisticien Paul McMillan, de l'université de Leicester au Royaume-Uni, qui nous a signalé à quel point le modèle (ligne bleue) ajustait parfaitement les points. Mais cela ne peut que nous rassurer sur la fiabilité des résultats.

La toute première détection d'un déclin képlérien

Le rayon le plus externe du disque de la Voie lactée est connu pour se trouver à 17 kpc du Centre galactique. Or, c'est à partir de ce rayon que l'on voit la courbe de rotation décliner rapidement, jusqu'aux étoiles les plus lointaines à 27 kpc. Nous avons alors comparé cette décroissance à ce que l'on attendrait d'un déclin pour une rotation képlérienne. De quoi s'agit-il ? Pour bien le comprendre, prenons un exemple plus proche de nous, le Système solaire. Le Soleil représentant 99 % de la masse de ce système, ce dernier peut être considéré comme affecté par la seule gravité de notre astre, celui-ci pouvant être considéré comme un point unique contenant toute la masse. Les lois de gravitation universelle de Newton ont été ici déclinées sous la forme des lois de Kepler, qui impliquent que les vitesses de rotation des planètes décroissent en fonction de la distance au Soleil. Et ce pas n'importe comment : Saturne est approximativement dix fois plus éloignée du Soleil que la Terre et sa vitesse de rotation est environ trois fois

plus faible. La deuxième loi de Kepler prédit en effet que la vitesse de rotation décroît comme l'inverse de la racine carrée de la distance au centre de masse (soit $V \sim R^{-1/2}$), ici le Soleil.

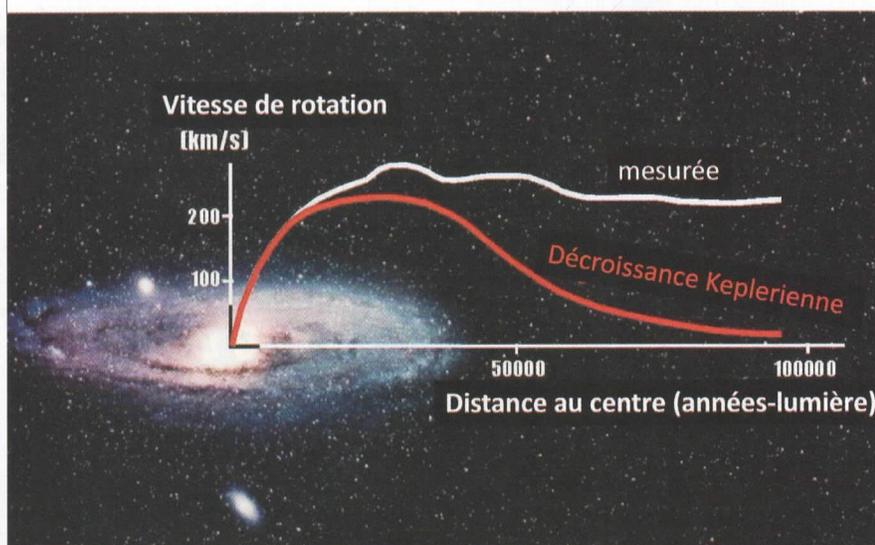
À notre grande surprise, la décroissance de la courbe de rotation de la Galaxie suit précisément ce déclin, depuis le bord du disque à 17 kpc jusqu'à 27 kpc ! Théoriquement, cela veut dire qu'au-delà de 17 kpc, la Galaxie dans son ensemble est équivalente à un point massif d'environ 200 milliards de fois la masse du Soleil. La masse totale de la Galaxie ne serait que de 206 milliards de masses solaires, avec une barre d'erreur de l'ordre de dix pour cent.

Ces résultats ont eu un retentissement considérable dans la communauté astronomique et cosmologique, et ont fait l'objet de nombreuses discussions. Pourquoi ? Tout d'abord, parce que c'est la première fois que l'on détecte le déclin képlérien dans la courbe de rotation d'une galaxie spirale. De plus, la masse dynamique de la Voie lactée était auparavant estimée par les cosmologistes à près de mille milliards de fois la masse du Soleil, c'est-à-dire cinq fois plus grande que les résultats que nous apporte *Gaia*. Plus intrigant encore : si l'on considère que la masse dite ordinaire (étoiles et gaz neutre) de la Galaxie est près de 60 milliards de fois la masse du

Soleil, cela veut dire que la masse invisible est à peine supérieure à deux fois la masse de matière ordinaire. C'est beaucoup moins que ce que l'on obtient pour les autres galaxies spirales (plutôt un facteur entre dix et vingt), ou même pour l'Univers dans son ensemble (cinq fois plus de matière invisible que de matière ordinaire). Comment cela se fait-il ? Allons d'abord examiner les autres galaxies et leurs courbes de rotation.

Les courbes de rotation plates des autres galaxies

L'astronome américain Lundmark (1925) a été l'un des premiers à mesurer la courbe de rotation de la grande galaxie d'Andromède (M31), suivi par Babcock (1939) puis Mayall (1951). Ils avaient déjà observé qu'elle restait plate jusqu'à près de 20 kpc (soit 65 000 années-lumière). C'est plus tard que Rubin et collaborateurs (1978, en utilisant l'hydrogène ionisé comme traceur, noté HII) et Bosma (1978, en utilisant l'hydrogène neutre, noté HI, comme traceur, ce qui lui a permis d'explorer les parties plus externes des galaxies) ont montré que plusieurs galaxies spirales, dont Andromède, avaient des courbes de rotation plates.



L'image ci-dessus montre le disque de M31 sur lequel est superposée la courbe de rotation en trait blanc (à noter que 1 kpc vaut 3 261,6 années-lumière). En rouge est indiqué ce que serait la courbe de rotation s'il n'y avait que de la matière ordinaire. Pour expliquer la courbe mesurée, il fallait ajouter de la matière. Et cela bien au-delà du disque, puisque c'est là que l'écart entre les deux courbes est le plus grand. Historiquement, cela a été la première preuve reconnue de la présence de matière invisible ou de matière sombre qui se distribue dans un halo massif entourant le disque de la galaxie spirale.



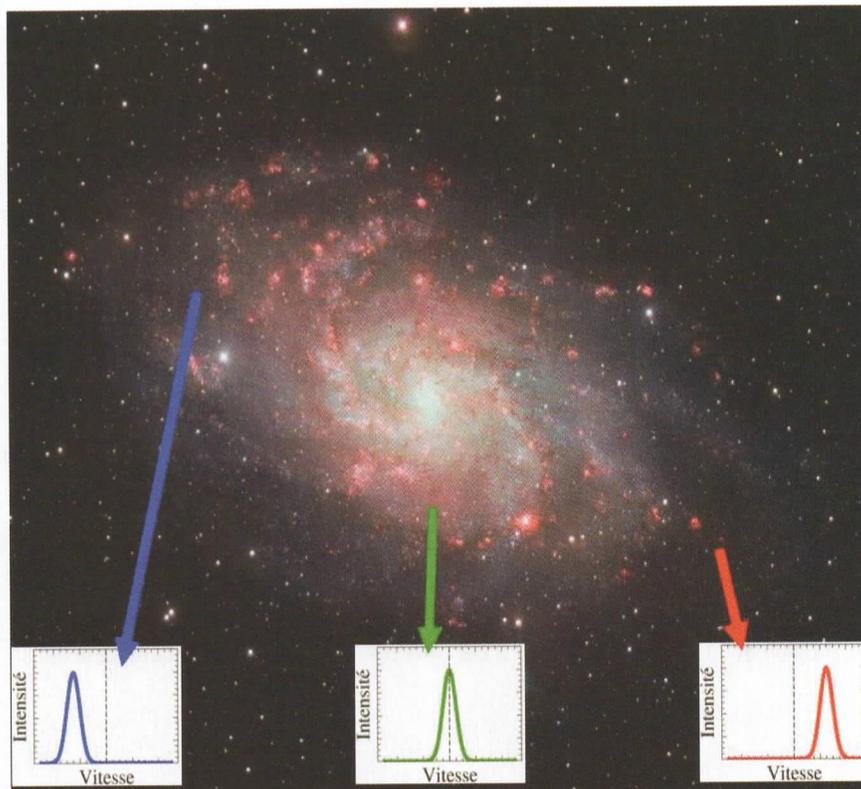
Et pour toutes les grandes galaxies spirales, on retrouve une courbe de rotation plutôt plate, et jamais de déclin képlérien. De quoi relativiser la découverte de la rotation de notre Galaxie par *Gaia*. Par exemple, on pourrait se dire que notre Galaxie, avec le déclin képlérien de sa courbe de rotation, n'est qu'une galaxie parmi plusieurs milliers d'autres pour lesquelles la courbe de rotation est plate.

Pourquoi une telle différence avec les autres galaxies ?

Du point de vue de sa morphologie, la Voie lactée est une galaxie spirale ordinaire de type Sb barrée. Elle semble comporter de nombreux bras spiraux quand on la compare à d'autres galaxies, mais cela n'en fait pas une galaxie vraiment extraordinaire, car d'autres galaxies présentent également plusieurs bras spiraux. En revanche, ce qui la singularise est que sa dernière fusion est très ancienne : de neuf à dix milliards d'années dans le passé, à comparer à environ six milliards d'années pour la moyenne des grandes galaxies spirales. Les résidus de cette fusion ont été découverts par *Gaia* et sont appelés *Gaia*-Sausage-Enceladus (GSE). Ils sont bien enfouis dans le halo interne de la Galaxie, et n'ont plus d'incidence sur les parties externes, c'est-à-dire sur la décroissance képlérienne observée. Par conséquent, on peut considérer que les étoiles situées à près de 27 kpc du Centre galactique sont à l'équilibre, ayant d'ailleurs eu le temps de faire 6 à 7 orbites² depuis la fusion GSE.

On peut ainsi se demander à nouveau pourquoi la Voie lactée aurait une dynamique si différente des autres grandes galaxies spirales.

Une première raison pourrait être d'ordre méthodologique. Avec *Gaia*, on connaît les positions 3D et les vitesses en 3D des étoiles, soit 6 dimensions, ce qui permet de prédire les orbites passées et futures. Avec *Gaia* DR3, les astronomes ont même démontré que la vitesse circulaire des étoiles dominait largement les deux autres composantes de la vitesse (radiale et perpendiculaire au disque), garantissant la circularité et l'équilibre des orbites. Par contre, pour les galaxies externes, on dispose de beaucoup moins d'informations : seule-



Cette image montre comment sont mesurées les courbes de rotation des galaxies spirales externes. Si une galaxie est suffisamment inclinée, les vitesses dues à la rotation seront différentes de chaque côté du disque. Cela est mesuré via les positions des raies d'émission du gaz ionisé en optique ou la raie HI à 21 cm pour le gaz, qui sont décalées par effet Doppler. La partie la plus à gauche se rapproche de nous, car les raies sont décalées vers le bleu par rapport à la vitesse du centre de la galaxie, alors qu'elles sont décalées vers le rouge dans la partie de droite qui s'éloigne donc de nous. Cela indique que la galaxie spirale est bien en rotation. Cependant, avec seulement trois dimensions au lieu de six pour *Gaia*, il est difficile de connaître la stabilité des orbites des étoiles ou du gaz des galaxies externes, ainsi que de leur circularité. Cela pourrait-il expliquer les différences avec la courbe de rotation de notre Galaxie ?

**Avec *Gaia*,
on connaît
les positions
3D et les
vitesses en 3D
des étoiles.**

ment deux positions dans l'espace et une vitesse sur la ligne de visée, c'est-à-dire un total de 3 dimensions sur 6 !

Il faut aussi remarquer que la courbe de rotation de la Galaxie obtenue par *Gaia* est mesurée dans une région du disque en direction de l'anti-centre, alors que la région opposée est inaccessible à cause de l'extinction par les poussières. Pourrait-il y avoir des asymétries suffisamment fortes qui expliqueraient un déclin képlérien vers l'anti-centre, mais pas dans les autres régions du disque ? Un tel phénomène ne se retrouve pas dans les courbes de rotation des galaxies externes isolées.

C'est qu'il y a une bonne raison de se poser la question de l'équilibre des orbites

des étoiles et du gaz. Dans les années 1970, on pensait que les galaxies spirales se formaient lors d'un effondrement primordial, aux toutes premières époques de l'Univers. On pensait que les galaxies spirales étaient en rotation depuis plus de dix milliards d'années, assurant ainsi leur équilibre. Cependant, l'histoire des fusions entre galaxies est indispensable pour bien comprendre leur dynamique. Dans les années 2007-2010, il a été démontré que seules des collisions de galaxies riches en gaz pouvaient former de grands disques spiraux tels qu'on les observe. Cela a été un des grands résultats scientifiques de l'époque, résolvant définitivement la difficulté des simulations cosmologiques qui, autrement, n'arrivaient qu'à reproduire de tout petits disques pour les galaxies spirales³. Aujourd'hui, l'ensemble de ces simulations tient compte des fusions entre galaxies et reproduit bien toutes les galaxies observées.

Il est donc important de connaître l'histoire des fusions passées pour interpréter la dynamique d'un disque de galaxie. Si une galaxie a subi une collision récente, jusqu'à quel rayon peut-on prétendre que le disque est à l'équilibre pour en déduire la masse intérieure aux orbites du gaz ou des étoiles ? On comprendra que c'est une des pistes de recherche intéressantes que poursuit notre groupe...

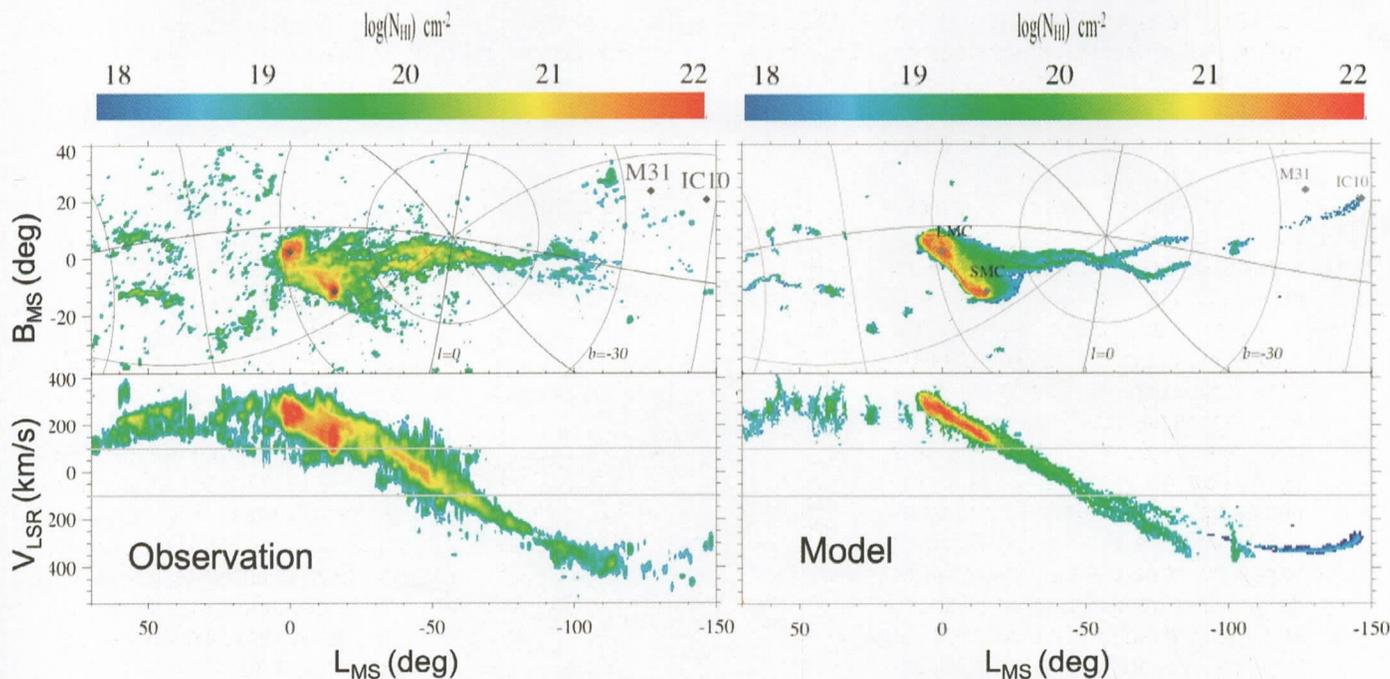
200 milliards de masses solaires : est-ce bien toute la masse de la Galaxie ?

Dès la publication de notre article, certains ont objecté que la Galaxie s'étendait bien au-delà d'un rayon de 27 kpc dans lequel la courbe de rotation a été mesurée, et qu'il y avait de la matière jusqu'à plusieurs centaines de kiloparsecs. C'est la stricte vérité, et la masse de deux cents milliards de masses solaires correspond seulement à la masse dynamique de la Galaxie, c'est-à-dire celle qui est en équilibre gravitationnel. On touche ici du doigt la question des limites spatiales de notre Galaxie. Jusqu'où s'étend-elle ?

Nous savons aujourd'hui que la Galaxie est entourée d'un gaz ionisé et chaud, que l'on appelle la couronne de gaz chaud (en anglais : *Galactic corona* ou *circum-galactic medium*, CGM). Nous avons pu appréhender la densité de ce gaz, en particulier via les effets qu'il cause sur les Nuages de Magellan. Les observations du télescope spatial *Hubble* ont démontré en 2007 que ces derniers venaient d'arriver dans le halo de la Voie lactée, ayant traversé une grande partie du halo et de son gaz chaud. Ils ont laissé deux traînées de gaz, causées par leur interaction avec le gaz chaud de la Galaxie, formant ainsi le grand courant magellanique de gaz neutre (HI).

Avec une longueur de pas moins de 240 degrés, le grand courant magellanique est la deuxième plus grande structure dans le ciel, après celle de la Voie lactée. La partie gauche de la figure ci-dessous présente les observations en HI, au-dessus dans le plan du ciel⁴, et en bas en changeant l'ordonnée par la vitesse radiale.

La partie droite de la figure ci-dessous décrit le modèle [3] qui reproduit le courant magellanique, celui-ci provenant du gaz perdu par les Nuages après extraction par pression dynamique causée par le gaz chaud de la Galaxie. Le modèle prédit aussi la collision récente entre les deux Nuages. Surtout, il donne une première estimation de la masse du gaz chaud entourant le disque de la Galaxie. Celle-ci atteint la valeur importante d'environ 150 milliards de masses solaires, presque celle de la masse dynamique de notre Galaxie. Mais voilà, ce gaz s'étend jusqu'à 200, voire 300 kpc, et sa densité est bien trop faible pour affecter la décroissance képlérienne de la courbe de rotation. De plus, le gaz chaud n'est pas seulement affecté par la gravitation de notre Galaxie, mais aussi par les conditions de pression et de température, c'est-à-dire ses conditions hydrodynamiques. Cela implique qu'il n'est pas vraiment en équilibre gravitationnel avec la Galaxie, mais qu'il est aussi confiné par le milieu intergalactique dans lequel notre Galaxie se meut. On le voit bien, nous atteignons maintenant les limites les plus lointaines de notre Galaxie.





Pourquoi d'autres méthodes prédisaient-elles une plus grande masse pour la Galaxie ?

Avant *Gaia*, obtenir la courbe de rotation de la Galaxie était une gageure, et donc un moyen peu pertinent pour calculer sa masse. Mais les astronomes sont ingénieux et ont donc imaginé d'autres méthodes. Parmi celles-ci, on pouvait considérer les 156 amas globulaires et la cinquantaine de galaxies naines qui peuplent le halo. La méthode : faire l'hypothèse que ces objets sont en équilibre avec le potentiel de la Galaxie, et en déduire ainsi la masse de cette dernière. Il en résulta des masses pour la Galaxie bien plus considérables que 200 milliards de masses solaires, jusqu'à cinq, voire dix fois plus grandes ! Et ces estimations de masses augmentaient lorsque l'on incluait les galaxies naines les plus lointaines, comme Leo I située à 258 kpc de nous. Cette dernière qui a pénétré le halo il y a près de deux milliards d'années, a atteint son péricentre et perdu son gaz

à son péricentre il y a un milliard d'années, et semble plutôt s'échapper de l'attraction de la Galaxie à grande vitesse.

Que se passe-t-il si on considère un objet de passage comme un satellite ? Prenons un exemple proche de nous. 'Oumuamua est cet objet mystérieux qui est passé à 38 millions de kilomètres du Soleil à la vitesse de 87,3 km/s. À cette vitesse, sa trajectoire a défrayé la chronique : elle était hyperbolique avec une excentricité de 1,2, ce qui voulait dire qu'Oumuamua n'était pas un satellite du Soleil et ne faisait que passer. Si on calculait la masse du Soleil à partir d'Oumuamua faussement considéré comme un satellite, on trouverait deux fois la masse réelle du Soleil. Une méthode à éviter, donc.

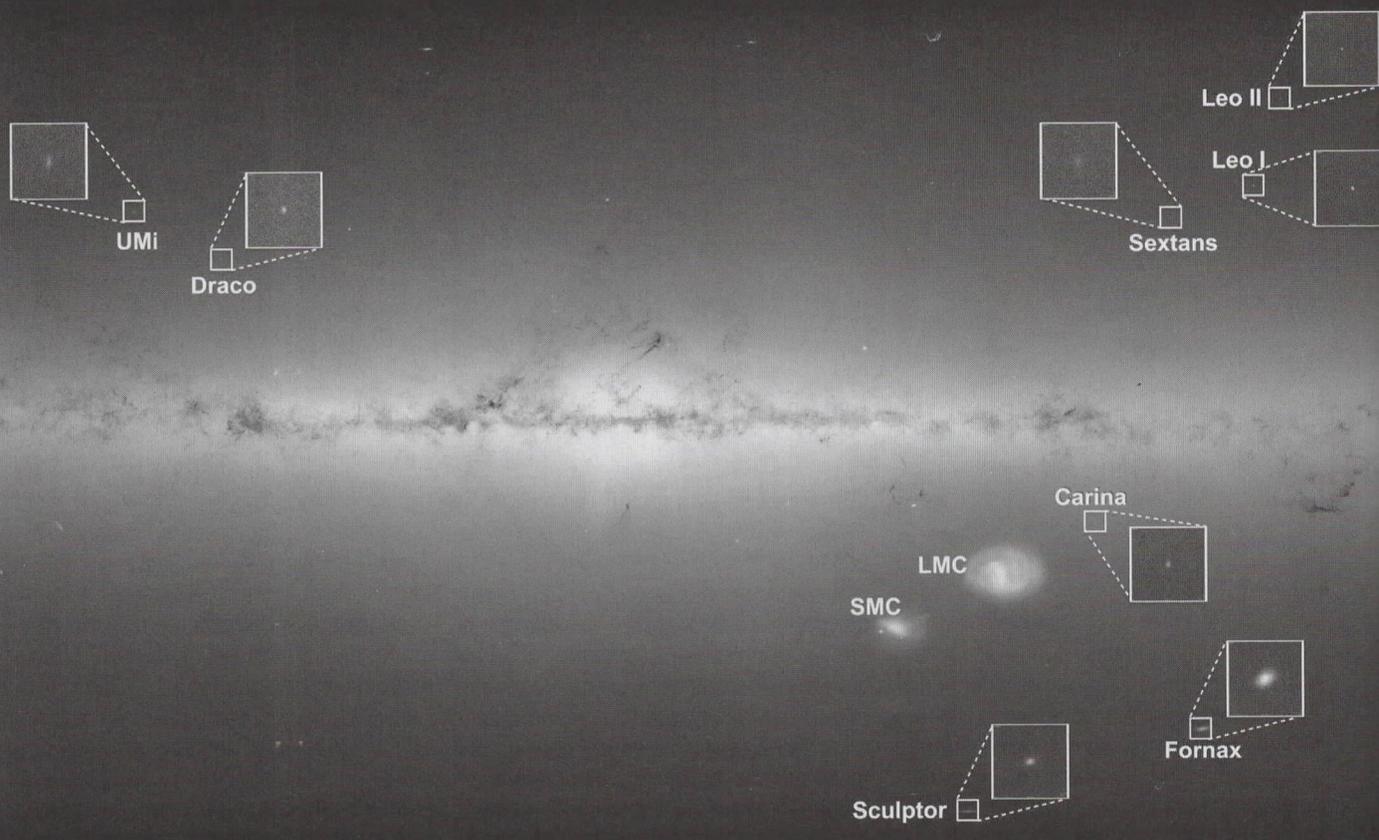
C'est le même problème si l'on considère qu'un amas globulaire ou qu'une galaxie naine sont en équilibre dynamique avec notre Galaxie, alors qu'ils viennent d'arriver dans son halo. C'est le cas du Grand Nuage de Magellan, qui tombe vers nous à la vitesse d'un million de kilomètres par heure. Une partie de sa vitesse vient de sa vitesse initiale, et le considérer

comme un satellite reviendrait à avoir une masse pour la Galaxie supérieure à 1000 milliards de masses solaires. Vis-à-vis de la courbe de rotation, cela reviendrait à avoir une vitesse de rotation de la Voie lactée de 230 km/s à 50 kpc, c'est-à-dire bien plus qu'à 20 kpc. Cela conduirait à une distribution de masse irréaliste, car très instable du point de vue dynamique.

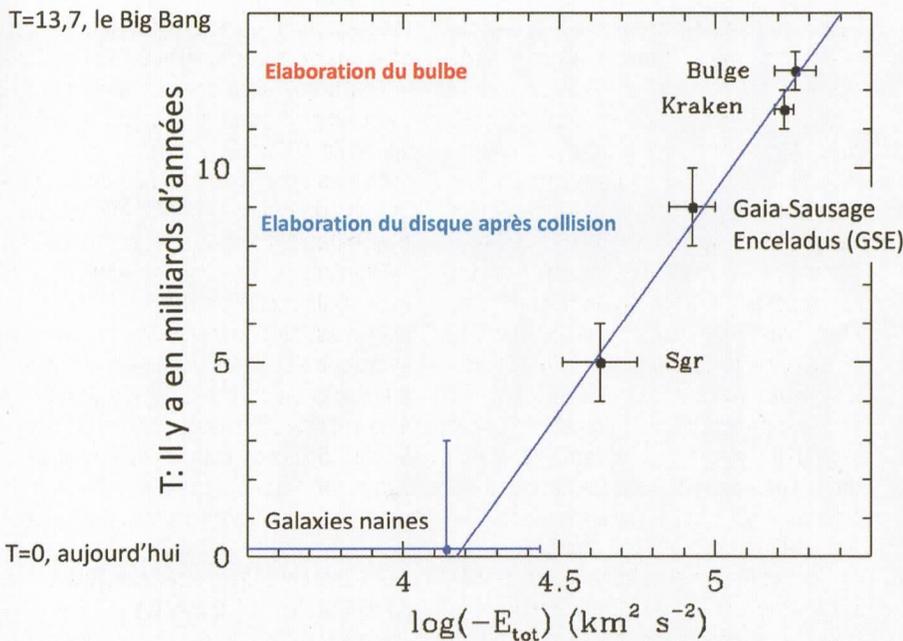
Finalement, nous connaissons maintenant les limites des différentes méthodes pour mesurer la masse de la Voie lactée. Le disque de notre Galaxie est suffisamment à l'équilibre pour nous donner la masse à l'équilibre jusqu'à environ 30 kpc. Sur les 156 amas globulaires qui nous environnent, deux, Pyxis et Eridanus, sont si éloignés et avec des orbites si peu circulaires qu'ils semblent arriver pour la première fois dans le halo de la Galaxie. Si l'on considère les 154 amas globulaires restants, leurs orbites sont compatibles avec une masse de 200 milliards de fois la masse du Soleil.

Quant aux galaxies naines, ces dernières nous révèlent bien des surprises. L'image ci-dessous est l'image du jour de l'Esa [4] qui montre notre Galaxie

(ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO)



T=13,7, le Big Bang



T: Il y a en milliards d'années

Cette figure, qui montre l'époque à laquelle se sont formées les structures en fonction de l'énergie totale du système, résume l'histoire passée de notre Galaxie et de ses accrétions.

Au début, les premières étoiles du bulbe se sont formées (il y a environ 12,5 milliards d'années), puis ont suivi la première rencontre avec une autre grande galaxie et leur fusion, appelée GSE (il y a environ 9 milliards d'années). Et plus récemment, la rencontre avec la galaxie naine du Sagittaire qui n'est pas encore complètement absorbée (il y a environ 5 milliards d'années). Les énergies orbitales des galaxies naines sont huit fois plus grandes que celles des résidus de la grande fusion GSE qui a eu lieu il y a 9 à 10 milliards d'années et trois fois plus que celle du Sagittaire. C'est parce que les galaxies naines sont arrivées bien plus récemment, il y a moins de trois milliards d'années.

entourée des galaxies naines les plus importantes, à commencer par les Nuages de Magellan (appelés en anglais LMC et SMC), puis Fornax, Sculptor, Leo I, Leo II, Sextans, Carina, Draco et Ursa Minor. Pourquoi l'Esa a-t-elle publié cette image ? Parce que *Gaia* permet de mesurer de façon précise les énergies orbitales des galaxies naines. De quoi s'agit-il ? : l'énergie orbitale est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle d'un objet en orbite. Lorsqu'un petit objet est tombé il y a très longtemps dans notre Galaxie, il a eu le temps de faire de nombreuses orbites, et donc des rencontres, des frottements, des collisions qui lui ont fait perdre une partie de son énergie orbitale. Au fur et à mesure que le temps passe, l'énergie orbitale tend à diminuer. Les cosmologistes ont pu établir une relation linéaire entre le temps passé par un satellite dans le halo et le logarithme de l'énergie orbitale, qui est indiquée par la ligne bleue dans la figure ci-dessus.

Il en résulte que les galaxies naines étant de récentes acquisitions de la Voie lactée,

leurs orbites ne permettent pas pour le moment de mesurer la masse de cette dernière. Cela conduit aussi à réviser complètement nos connaissances sur ces objets, qui ont été souvent considérés comme des satellites de la Galaxie constituée presque exclusivement de matière sombre. Mais c'est une autre histoire, à raconter plus tard.

En conclusion, les derniers relevés de *Gaia* ont apporté la courbe de rotation la plus précise du disque de la Galaxie, découvrant pour la première fois son déclin képlérien au bord de son disque stellaire. Cela questionne la cosmologie, car notre Galaxie pourrait être exceptionnelle par sa faible masse, et aussi par un rapport particulièrement bas entre sa masse invisible et sa masse visible.

Il est possible que cela ouvre grand les portes d'une révision des courbes de rotation des galaxies externes, en tenant compte de l'histoire passée des grands disques de galaxies spirales. Une histoire à suivre, donc.

Finalement, notre Galaxie est-elle exceptionnelle ? Il semble que oui si l'on considère sa courbe de rotation qui ne ressemble à au-

cune autre. En ce cas, on pourrait se dire qu'il serait très anthropocentrique⁵ de considérer que la courbe de rotation de notre Galaxie aurait plus de valeur que celles des milliers de galaxies avec une courbe de rotation plate. Mais cela peut être considéré plutôt comme une nouvelle contrainte sur la distribution de masse dans l'Univers grâce aux meilleures et d'ailleurs aux seules observations de l'espace à 6 dimensions (espace et vitesses) disponibles à l'échelle d'une galaxie, en l'occurrence la nôtre, parce que c'est la seule qui soit accessible à l'observation par *Gaia*. ■

Notes

1. En fait, le calcul est un peu plus complexe parce que le Soleil est probablement né à un rayon de 5 kpc pour migrer doucement vers son emplacement actuel à cause de la dynamique des bras spiraux. Cela implique que le nombre d'orbites effectuées par le Soleil serait un nombre entre 22 et 35.
2. Les dynamiciens estiment qu'il faut de trois à cinq orbites pour considérer des satellites à l'équilibre avec la masse centrale, et donc de pouvoir mesurer la masse à l'intérieur de l'orbite. Par exemple, le Soleil a fait 22 orbites autour du centre galactique depuis sa formation, il y a cinq milliards d'années.
3. Cela a été appelé, en 1999, le problème de la « crise du spin » ou de la « catastrophe du moment angulaire ».
4. Les astronomes utilisent dans cette figure des coordonnées magellaniques (LMS et BMS) dans le but de placer le grand courant dans toute sa longueur horizontalement.
5. L'histoire de la science, de l'origine de l'Homme à celle de l'Univers, nous a appris qu'il fallait toujours rester prudent lorsqu'un point de vue anthropocentrique a été adopté, car il a toujours été par la suite démenti. En exemple, les premières théories cosmogoniques qui considéraient la Terre au centre de l'Univers, puis le Soleil après les travaux de Galilée, Kepler, Newton, et enfin le centre de notre Galaxie lors de la découverte de cette dernière par Herschel en 1785. La notion même de centre de l'Univers disparut complètement avec la découverte des galaxies extérieures grâce d'une part aux travaux d'Henrietta Leavitt en 1908 et de Hubble en 1920, et d'autre part avec la théorie de l'expansion de l'Univers puis du Big Bang au début du XX^e siècle, dans la foulée des travaux de Friedmann, Lemaître, Robertson et Walker.

Références

- [1] Christina Eilers, David Hogg, Hans-Walter Rix, et Melissa Ness, « The circular velocity curve of the Milky Way from 5 to 25 kpc », 2019, *The Astrophysical Journal*, 871, 120.
- [2] Jiao Yongjun, Hammer François, Wang Haifeng, Wang Jianling, Amram Philippe, Chemin Laurent, Yang Yanbin, « Detection of the Keplerian decline in the Milky Way rotation curve », *Astronomy and Astrophysics* 678, 2023, doi:10.1051/0004-6361/202347513.
- [3] Hammer F., Yang Y.-B., Flores H., Puech M., Fouquet S., « The Magellanic Stream System. I. Ram-Pressure Tails and the Relics of the Collision Between the Magellanic Clouds », *The Astrophysical Journal* 813, 2015, doi:10.1088/0004-637X/813/2/110.
- [4] ESA News : « Gaia reveals that most Milky Way companion galaxies are newcomers to our corner of space » : www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/Gaia_reveals_that_most_Milky_Way_companion_galaxies_are_newcomers_to_our_corner_of_space.