

spatial travaille dans la gamme optique, dont la lumière est absorbée par la poussière interstellaire, *Gaia* ne peut pas sonder facilement des bras galactiques lointains. Par chance, ces nuages de particules sont transparents pour les ondes radio. Ce qui fait de ces dernières un bon outil pour explorer l'intégralité du disque et en cartographier la structure.

Actuellement, il existe deux grands projets de cartographie de la Voie lactée qui utilisent la même technique d'astronomie radio: l'interférométrie à très longue base ou VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*). Le programme *Vera* (*VLBI exploration of radio astronomy*) implique quatre radiotélescopes japonais répartis sur tout l'archipel. *Bessel* (*Bar and Spiral Structure Legacy*) s'appuie sur les dix radiotélescopes du VLBA (distribués de Hawaï aux îles Vierges américaines dans les Caraïbes). Les télescopes de ces deux dispositifs sont séparés par des distances comparables au diamètre de la Terre. Dès lors, ces réseaux atteignent une résolution angulaire qui surpasse celle de n'importe quel autre télescope actuel, quelles que soient les longueurs d'onde considérées.

La mise en place technique de la VLBI est délicate. Les radiotélescopes du réseau doivent effectuer leurs observations simultanément et

télescope spatial Hubble présente une résolution de 0,04 seconde d'arc.

Grâce à la technique VLBI et la précision angulaire associée, nous calculons la distance d'étoiles lointaines en utilisant la méthode de la parallaxe. Cela consiste à observer un objet depuis deux positions différentes et à mesurer le déplacement apparent par rapport à un arrière-plan très lointain et considéré comme fixe. On peut reproduire cet effet avec son pouce, bras tendu, que l'on examine alternativement avec l'œil gauche puis l'œil droit. Nos yeux étant séparés de quelques centimètres, le pouce semble bouger d'un angle, la parallaxe, d'environ six degrés quand on ferme un œil puis l'autre. Si l'on connaît la distance qui sépare les deux points d'observation et que l'on mesure la parallaxe, on peut calculer la distance. Plus un objet est lointain, plus la parallaxe est faible, d'où la nécessité de faire appel à la VLBI pour les grandes distances au sein de la Voie lactée.

DES MASERS INTERSTELLAIRES

Pour cartographier les bras spiraux de la Galaxie, nous nous sommes intéressés à un type particulier d'étoiles jeunes et massives. Ces astres, à courte durée de vie, sont souvent associés aux régions des bras où la formation d'étoiles est intense. Par ailleurs, ils ont une température si élevée qu'ils ionisent le gaz environnant: ce dernier brille alors de la lumière bleue si caractéristique des bras spiraux que nous observons dans les galaxies lointaines. Mais de notre point de vue, plongés dans la Voie lactée, cette lumière bleue et ces étoiles sont difficiles à voir directement à cause de la poussière interstellaire.

La solution se trouve en périphérie de ces régions fortement ionisées: les molécules d'eau et de méthanol y sont excitées par la lumière de l'étoile et constituent alors de puissantes sources d'émission radio. Il s'agit en fait d'un phénomène naturel de «maser» dont le rayonnement est peu atténué par la poussière galactique. Le maser est l'équivalent en radio des lasers dans le domaine optique. Dans le contexte astrophysique, les émissions maser proviennent de nuages de gaz aussi vastes que le Système solaire et d'une masse comparable à Jupiter. Sur une image radio du ciel, ces régions forment des «points» très brillants, auxquels il est possible d'appliquer la méthode de la parallaxe pour déterminer leur distance.

Avec les projets *Bessel* et *Vera*, les astronomes ont calculé (à partir des masers et de la parallaxe) la distance de près de 200 jeunes étoiles chaudes à travers la Voie lactée. Ces résultats nous donnent un assez bon aperçu d'environ un tiers de la Galaxie et mettent en évidence la présence de quatre bras principaux.

synchroniser les données recueillies grâce aux meilleures horloges atomiques. Les chercheurs centralisent ensuite ces informations sur un ordinateur qui doit calculer des corrélations croisées de tous les signaux. Après une phase de calibration importante, le résultat est une image numérique de ce que l'on pourrait voir si nos yeux étaient séparés l'un de l'autre par une distance supérieure à 12 000 kilomètres (le diamètre terrestre). On atteint ainsi une résolution angulaire incroyable, meilleure que 0,001 seconde d'arc (il y a 3 600 secondes d'arc dans 1 degré et l'ensemble de la sphère céleste fait 360 degrés). Par comparaison, l'œil humain est capable de distinguer des éléments séparés au mieux de 40 secondes d'arc, et le



La Voie lactée serait dotée d'une barre centrale et de quatre bras spiraux



>

> La carte montre également que le Soleil est très proche d'une cinquième structure, le bras local, qui semble être un fragment isolé de bras spiral. Ce fragment est aussi nommé l'«éperon d'Orion», ou «éperon local». On pensait, comme le suggère ce nom, que cette structure mineure était une sorte de ramification annexe d'un bras spiral, comme on en voit dans d'autres galaxies. Cette interprétation pourrait être erronée. Dans nos données, ce fragment ressemble plutôt à un segment orphelin d'un bras qui s'enroule sur moins d'un quart de la Voie lactée.

Malgré sa longueur réduite et son statut secondaire, ce tronçon de bras hébergerait une activité de formation d'étoiles massives comparable à celle du bras de Persée voisin. D'ailleurs, certains astronomes pensent que le bras de Persée est l'un des deux bras principaux de la Galaxie (l'autre étant le «bras Écu-Croix», aussi nommé «bras du Centaure»). Nous constatons cependant que la formation d'étoiles massives y diminue fortement alors que le bras se replie vers le centre de la Galaxie. Le bras de Persée n'apparaîtrait donc probablement pas aussi important pour un observateur extérieur.

En utilisant la position des étoiles massives et en modélisant leur mouvement, nous avons estimé certaines caractéristiques de la Voie lactée. Le Soleil se trouve à 8 150 parsecs (environ 26 600 années-lumière) du centre galactique, avec une incertitude de plus ou moins 150 parsecs. Cette valeur est inférieure à celle de 8 500 parsecs officiellement recommandée depuis des décennies par l'Union astronomique internationale. Nous avons aussi déterminé que le Système solaire se déplace à une vitesse de 236 kilomètres par seconde sur son orbite, soit près de huit fois celle de la Terre autour du Soleil. À partir de ces données, on peut déduire que le Soleil effectue un tour de la Galaxie en 212 millions d'années.

UNE FORME DE CHIPS

Si l'on ne considère pas la barre centrale, la partie interne du disque de poussière galactique (entre l'orbite du Soleil et le centre galactique) est très mince et quasiment plate. Ce résultat est connu depuis longtemps; en revanche, la position du Soleil par rapport à ce plan était davantage débattue. Récemment, le consensus chez les astronomes était que le Système solaire était situé à 25 parsecs (82 années-lumière) au-dessus du plan. Nous obtenons une valeur un peu différente. En ajustant le plan galactique grâce à la position des étoiles massives, nous concluons que le Soleil se trouve seulement 6 parsecs (20 années-lumière) au-dessus du plan, une différence qui reste à élucider mais qui confirme que nous sommes situés très près du plan galactique.

Depuis quelques années, les astronomes ont découvert que le disque de poussière n'est

pas parfaitement plan et prend une forme de chips. De nombreuses expériences ont confirmé cette observation (*voir, par exemple, la figure page ci-contre*). Nous confirmons aussi ce résultat avec nos étoiles massives, ce qui renforce la pertinence de notre méthode d'observation.

Pour se repérer facilement dans la Galaxie, les astronomes ont divisé la Voie lactée en quadrants, qui se rejoignent au niveau du Soleil. Nous avons tracé les bras dans trois des quatre quadrants. Pour compléter notre carte, nous aurions besoin d'observations menées depuis l'hémisphère Sud de la Terre. Un tel projet est en préparation; il fera appel à des télescopes en Australie et en Nouvelle-Zélande.

En attendant, nous pouvons extrapoler dans le quatrième quadrant les bras que nous avons déjà identifiés, en nous appuyant également sur d'autres informations comme les émissions de l'hydrogène neutre ou du monoxyde de carbone. On retrouve ainsi les quatre bras qui avaient été postulés précédemment: le bras de la Règle (ou bras du Cygne), le bras Écu-Croix, le bras du Sagittaire et le bras de Persée. Il nous faut cependant être prudents, car nous n'avons



Le Soleil serait situé à environ 26 600 années-lumière du centre galactique



qu'une seule mesure de pouponnière d'étoiles à grande distance du centre galactique. La position de cette région, sa vitesse (obtenue grâce au monoxyde de carbone) nous donne assez de confiance sur la validité de notre extrapolation et notre façon de connecter les bras dans ce quatrième quadrant. Mais d'autres mesures seront nécessaires pour consolider ce résultat.

Nous avons donc maintenant une vision plus claire de notre voisinage cosmique. Il semble que la Voie lactée soit une galaxie spirale à quatre bras, avec une barre centrale lumineuse et relativement symétrique. Le Soleil se situerait sur le plan galactique assez loin du centre. En plus des bras qui s'enroulent quasiment sur un tour complet, la Galaxie présente au moins un autre segment de bras (le