

fréquence d'ingestion de galaxies naines et le temps nécessaire pour s'approprier leurs étoiles. Les archéologues galactiques ont donc cherché à localiser davantage de courants stellaires, afin de les étudier en détail, et à repérer des vestiges de courants disparus.

Ils ont exploité plusieurs approches pour trouver les courants d'étoiles de la Voie lactée. En premier lieu, ils ont cherché des ensembles d'étoiles situées à des distances comparables qui se regroupent en longs filaments. Pour cela, ils avaient besoin d'une bonne carte tridimensionnelle des étoiles de la Galaxie, qui indique la position d'autant d'étoiles que possible dans toutes les directions.

Les archéologues galactiques se sont ainsi penchés sur les données du projet SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*). Un télescope est dédié à ce relevé à l'observatoire d'Apache Point, au Nouveau-Mexique.

Les astronomes ont ainsi créé une base de données de plus de 80 millions d'étoiles de la Voie lactée réparties sur plus d'un quart du ciel, avec des renseignements sur leur position, leur couleur et d'autres caractéristiques. Le nombre important d'étoiles de ce catalogue constitue un excellent « site de fouille » pour chercher des fossiles, témoins du passé de la Voie lactée.

Les chercheurs y ont repéré des étoiles susceptibles d'être à la bonne distance pour se trouver dans le halo galactique. Ils ont identifié près d'un million d'étoiles qui seraient des intruses potentielles, ayant appartenu à une galaxie depuis longtemps défunte. Et, parmi ces étoiles, ils ont retrouvé des courants stellaires en ciblant des zones plus denses en étoiles et en forme de queue.

Les astronomes savaient à quoi ces queues ressembleraient, en partie grâce à des simulations que j'avais créées et publiées en 2005 avec le cosmologiste James Bullock de l'Université de Californie à Irvine. Nous avons utilisé notre compréhension de la formation hiérarchique des halos de matière noire, combinée à la physique des forces de marée, pour prédire la taille et l'étalement des courants stellaires créés lors de l'absorption de nombreuses galaxies naines par la Voie lactée en formation. Nous savions, par exemple, que la queue devait s'étaler en amont et en aval de la galaxie, contrairement à celle d'une comète dont les débris sont repoussés dans une seule direction par le vent solaire.

La première preuve convaincante d'un courant stellaire étendu a été obtenue en 2003, quand une équipe d'astronomes dirigée par Steve Majewski, de l'Université de Virginie, a découvert des queues géantes émanant du plus proche satellite connu de la Voie lactée, la galaxie naine du Sagittaire. L'analyse reposait sur les données d'un projet similaire au SDSS, mais dans l'infrarouge, le projet 2MASS (*Two Micron All Sky Survey*). Les courants se situent près de l'orbite du Sagittaire et contiennent presque autant d'étoiles qu'il n'en reste dans la galaxie du Sagittaire elle-même. Les queues sont si longues qu'elles encerclent presque la Voie lactée. Les astronomes avaient pris la Galaxie en flagrant délit.

Depuis cette découverte, les archéologues galactiques ont mis au jour une douzaine d'autres courants stellaires autour de la Voie lactée dans le catalogue SDSS. D'après la longueur des queues du Sagittaire, on estime que la galaxie naine perd ses étoiles depuis deux à trois milliards d'années. Les autres courants semblent également âgés de quelques milliards d'années. Ces

Le catalogue SDSS constitue un bon « site de fouille » pour chercher des témoins du passé de la Voie lactée

observations suggèrent que la Voie lactée digérait des galaxies plus souvent au début de son histoire, et que ce rythme a decru récemment à mesure que le nombre de galaxies naines disponibles diminuait.

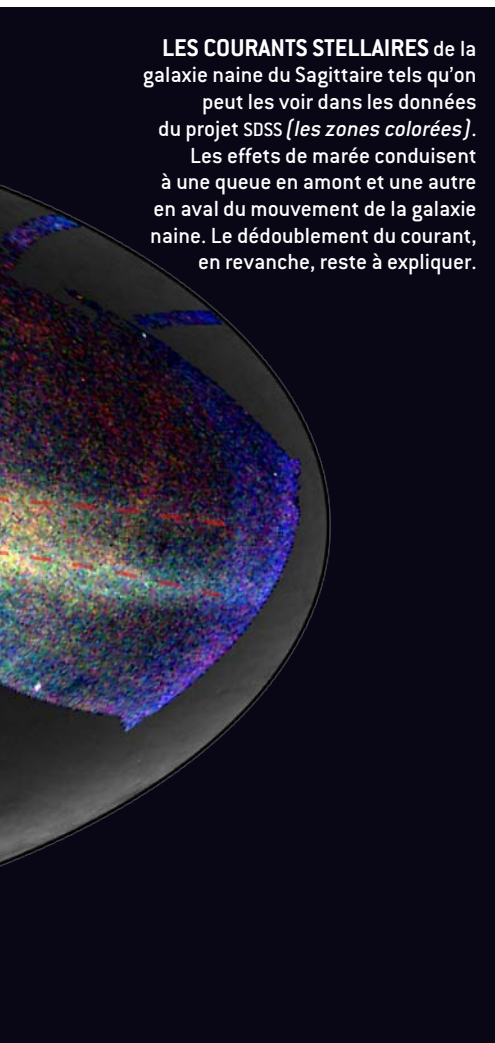
La découverte des courants stellaires est en accord avec les prédictions de la théorie de formation hiérarchique. Cependant, les courants stellaires connus ne représentent probablement qu'une fraction de ceux qui existent. De nombreux autres plus anciens, trop diffus et discrets pour être vus avec les moyens actuels, renferment sans doute des informations sur le passé de notre galaxie.

Nouveaux outils de fouille

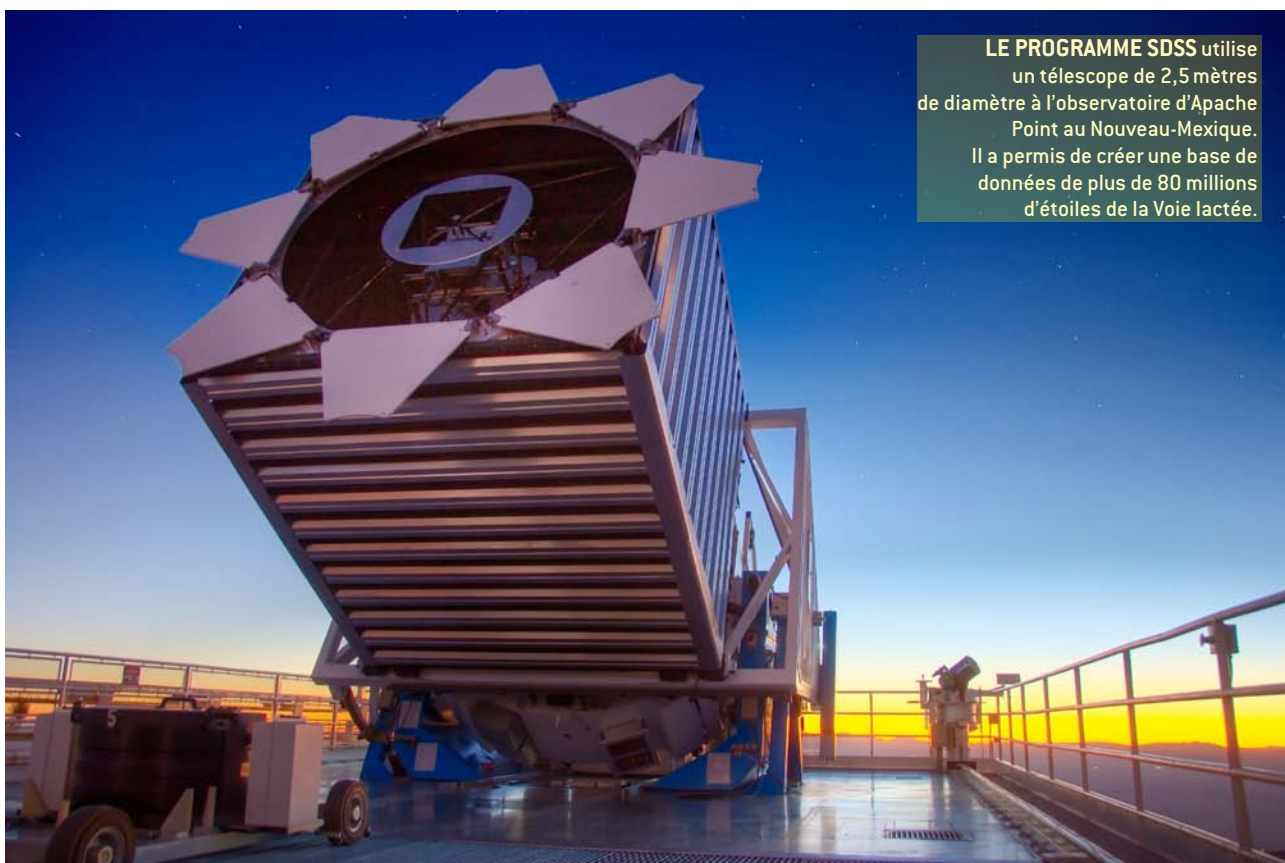
De fait, en se fondant uniquement sur la position des étoiles pour trouver les courants stellaires, on passe à côté de nombreuses queues anciennes. En effet, même si les différences de propriétés orbitales entre les étoiles sont initialement petites, les courants finissent par s'allonger, diffuser et s'estomper au point de perdre toute structure évidente au bout de quelques milliards d'années.

Les astronomes cherchent maintenant à exploiter d'autres propriétés stellaires pour trouver des courants plus diffus, ainsi que des vestiges de courants disloqués. Ces ensembles d'étoiles aideront à explorer l'époque la plus active de formation des galaxies, il y a plus de dix milliards d'années, c'est-à-dire dans les quelques milliards d'années qui ont suivi le Big Bang, quand la plupart des étoiles de l'Univers se sont formées. À cette époque, ce ne sont

LES COURANTS STELLAIRES de la galaxie naine du Sagittaire tels qu'on peut les voir dans les données du projet SDSS (*les zones colorées*). Les effets de marée conduisent à une queue en amont et une autre en aval du mouvement de la galaxie naine. Le dédoublement du courant, en revanche, reste à expliquer.



© S. Koposov et la collaboration SDSS-III



LE PROGRAMME SDSS utilise un télescope de 2,5 mètres de diamètre à l'observatoire d'Apache Point au Nouveau-Mexique. Il a permis de créer une base de données de plus de 80 millions d'étoiles de la Voie lactée.

© David Kirby

pas seulement quelques petites galaxies et amas stellaires, mais des centaines, qui sont happés pour former la Voie lactée.

L'une des manières de traquer les restes de galaxies défunctes consiste à rechercher des étoiles ayant des orbites similaires. Si la dispersion des étoiles d'un courant stellaire a commencé il y a longtemps, leur position actuelle ne permet plus de les reconnaître comme appartenant au même courant. En revanche, nous pouvons utiliser leur mouvement pour identifier les étoiles qui ont fait autrefois partie de la même galaxie satellite et pour apprendre comment elles ont rejoint la Voie lactée. En effet, leur mouvement devrait garder certaines similarités. C'est l'un des nombreux objectifs du satellite *Gaia* de l'Agence spatiale européenne, lancé en décembre 2013.

Gaia consacrera les quatre prochaines années à enregistrer des données pour les archéologues galactiques en mesurant la distance, la position et le mouvement de plus d'un milliard d'étoiles. Cette moisson de données permettra aux astronomes de calculer l'orbite complète de chaque étoile. Ainsi, nous pourrons sélectionner

des astres présentant des propriétés orbitales similaires et ayant probablement la même galaxie d'origine, et cela même si les positions dans le ciel n'indiquent plus leur parenté.

■ BIBLIOGRAPHIE

N. Libeskind, **Les galaxies naines et la toile cosmique**, *Pour la Science*, n° 439, mai 2014.

J. S. Bullock et K. V. Johnston, **Tracing galaxy formation with stellar halos. 1. Methods**, *Astrophysical Journal*, vol. 635, pp. 931-949, 2005.

K. Freeman et J. Bland-Hawthorn, **The new galaxy : Signature of its formation**, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 40, pp. 487-537, 2002.

Comparer les compositions chimiques

La composition chimique des étoiles est encore une autre façon de traquer leur lieu de naissance et donc un autre moyen potentiel de découvrir les courants stellaires. La composition globale des étoiles évolue constamment en raison de la fusion nucléaire qui anime le cœur de l'astre, transformant les éléments légers en éléments plus lourds. Mais la fusion nucléaire ne se produit que dans les régions centrales les plus denses et chaudes de l'étoile. L'atmosphère de l'étoile, qui est la région accessible aux instruments des astronomes, serait quasi identique au gaz d'où elle a émergé.

Kenneth Freeman, de l'Université nationale australienne, à Canberra, et Joss Bland-Hawthorn, de l'Université de Sydney, utilisent cette information pour regrouper des étoiles présentant la même empreinte

chimique et pour reconstituer l'amas de gaz qui les a vus naître, indépendamment de leur position actuelle dans le ciel.

Fondée sur la seule composition chimique, la méthode de Kenneth Freeman et Joss Bland-Hawthorn n'est pas suffisante pour identifier des étoiles associées à une galaxie naine, car ces galaxies contiennent probablement des étoiles nées dans divers amas de compositions chimiques distinctes. Néanmoins, en complétant cette approche avec les connaissances sur la formation des galaxies et des étoiles, on détermine certains aspects de l'accrétion des galaxies naines par la Voie lactée.

Tout d'abord, les étoiles se formant plus tardivement au sein d'une galaxie donnée contiennent généralement plus d'éléments lourds que celles qui se sont formées au début, parce que le matériau qui les constitue a déjà été enrichi avec les restes des générations précédentes d'étoiles. Ensuite, le processus d'enrichissement dépend d'écoulements de gaz qui sont gouvernés en partie par l'influence gravitationnelle du halo de matière noire de la galaxie.

Ces deux effets suggèrent que des galaxies de masses proches happées et détruites à peu près en même temps devraient fournir une collection d'étoiles dont la distribution de composition chimique est similaire, c'est-à-dire ayant le même éventail d'abondances pour de nombreux éléments. À l'inverse, des différences sur la masse des galaxies naines ou sur l'époque d'accrétion vont conduire à des variations de distribution chimique des étoiles entrant dans leur composition. Par conséquent, la distribution globale de composition chimique des étoiles autour de la Voie lactée nous permettrait de définir des classes de galaxies de même masse et avalées en même temps, puis d'estimer la part des étoiles de la galaxie provenant de chaque classe, même si on ne pourra pas isoler une galaxie individuelle.

Duane Lee a exploré cette voie quand il était étudiant dans mon équipe à l'Université Columbia. Ses travaux préliminaires suggèrent que les marqueurs chimiques seraient assez sensibles pour que l'on retrouve les contributions des galaxies naines, même les

plus petites, détruites très tôt dans l'histoire de la galaxie. En sachant à quelle époque est arrivée chaque classe d'étoiles, nous pouvons commencer à esquisser une séquence de cannibalisations et à retracer l'histoire de l'accrétion de la Voie lactée, en remontant aux périodes les plus anciennes. Plusieurs équipes d'astronomes mesurent actuellement les compositions chimiques de millions d'étoiles. Le premier groupe est celui du relevé GALAH (*GALactic Archeology with HERMES*) dirigé par Kenneth Freeman et Joss Bland-Hawthorn. Un autre est APOGEE (*APO Galactic Evolution Experiment*), démarré en 2011 dans le cadre du relevé SDSS. Le projet *Gaia*-ESO de l'Observatoire européen austral étudiera plus de 100 000 étoiles et utilisera les données du satellite *Gaia*.

Les archéologues galactiques commencent seulement à réaliser qu'étudier la Voie lactée revient en quelque sorte à étudier un millier de galaxies – tous ces objets plus petits qui se sont combinés pour former notre grande galaxie. Les fossiles de ces galaxies disparues ne nous renseignent pas seulement sur l'histoire de la Voie lactée, mais aussi sur celle de toutes les petites galaxies qu'elle a incorporées. Nous devrions bientôt être en mesure d'étudier comment les galaxies de différentes tailles se sont formées à différentes époques. Dans la prochaine décennie, ces analyses contribueront autant à notre compréhension de la Galaxie que la découverte de courants stellaires autour de la Voie lactée durant la décennie passée.

À terme, nous aimerions savoir comment se sont formées les toutes premières galaxies de l'Univers. Les premiers ancêtres de galaxies semblables à la nôtre sont trop petits et lointains pour être directement détectables, mais l'archéologie galactique pourrait révéler les vestiges de ces premiers germes : les étoiles très anciennes qui portent encore la marque de leur origine sont dispersées ici même, dans la Voie lactée. Ainsi, ce n'est pas en cherchant plus loin, mais en creusant dans notre propre jardin, que nous pourrions enfin accéder à l'Univers primordial et aux premières étapes de la formation des galaxies. ■

Le programme
Gaia
consacrera
les prochaines années
à mesurer les positions et
les mouvements de plus
d'un milliard d'étoiles