

Que peut-on apprendre grâce à l'archéologie galactique ?

La composition chimique précise par exemple les conditions dans lesquelles les étoiles d'un même amas sont nées, si le processus a été rapide ou lent, ancien ou récent, etc. Par exemple, quand deux galaxies entrent en collision, cela perturbe le gaz interstellaire et crée des surdensités locales avec l'émergence de pouponnières d'étoiles. Lors d'un tel épisode, on assiste à une formation d'étoiles plus intense, à une perturbation de la cinématique des étoiles présentes initialement et à l'apparition d'une nouvelle population d'étoiles avec une cinématique et une composition chimique atypiques par rapport aux étoiles *in situ*.

En 2018, avec l'équipe d'Amina Helmi, de l'université de Groningue, aux Pays-Bas, nous avons identifié dans le catalogue de *Gaia* un groupe d'étoiles, assez proche du Soleil, dont la composition était différente et surtout qui tournait autour du centre galactique en sens inverse. Grâce à des simulations, nous avons conclu que ces étoiles étaient le résultat d'une collision de la Voie lactée avec une autre galaxie, que nous avons nommée Gaia-Enceladus. Un événement qui a eu lieu il y a 10 milliards d'années ! Ces simulations ont permis d'estimer que, à l'époque, la Voie lactée était seulement quatre fois plus massive que la galaxie qu'elle a engloutie. Cette collision a eu une influence majeure sur la structure de la Voie lactée. Aujourd'hui, elle n'aurait pas eu le même impact, car la différence de masse aurait été beaucoup plus grande.

Qu'en est-il de la galaxie naine du Sagittaire ?

Le catalogue de *Gaia* révèle que la Voie lactée a connu bien d'autres collisions. Une rencontre particulièrement intéressante est celle, toujours en cours, avec la galaxie naine du Sagittaire. Découverte en 1994 par Rodrigo Ibata, de l'observatoire de Strasbourg, cette galaxie naine se trouve actuellement proche du plan galactique à l'opposé du Soleil, ce qui rend son observation très difficile. À cause des forces de marée de la Voie lactée, la galaxie du Sagittaire se « déchire » et laisse sur son passage un « courant stellaire », un long ruban d'étoiles. L'étude de sa trajectoire montre que la galaxie aurait percuté le plan galactique trois fois.

En 2018, une équipe autour de Teresa Antoja, de l'Institut des sciences du cosmos, à Barcelone, a étudié le mouvement d'un million d'étoiles proches du Soleil dans le catalogue de *Gaia*, avec une attention particulière pour leur vitesse dans la direction perpendiculaire au plan galactique. La cinématique obtenue était très surprenante, pas du tout ce qui était attendu. Les simulations ont suggéré que leur mouvement est compatible avec le dernier passage de la galaxie du Sagittaire au-dessus du centre de la Voie lactée, il y a environ 500 millions d'années.



La mission Gaia fait de l'archéologie galactique



Ces passages déstabilisent-ils la Voie lactée ?

Depuis la fin des années 1950, les astronomes ont constaté que le disque galactique n'est pas plat mais a une forme de chips. L'origine de cette forme a fait l'objet de nombreuses hypothèses : influence du champ magnétique intergalactique, des galaxies voisines, etc. Avec les données de *Gaia*, Eloisa Poggio, de l'observatoire d'astrophysique de Turin, et ses collègues ont montré que cette déformation n'est pas statique : elle présente un mouvement de précession, qui réalise un tour en 700 millions d'années (la période de révolution du Soleil autour du centre galactique est d'environ 220 millions d'années). La vitesse de précession est malgré tout plus rapide qu'attendu dans les différents scénarios envisagés. Sa source est donc probablement un événement récent ou en cours, et assez important comme une collision avec une autre galaxie. Certains chercheurs pensent que la galaxie naine du Sagittaire est la source de cette perturbation, mais d'autres avancent qu'elle est trop petite pour avoir un impact aussi important.

Une conclusion de ces travaux est que la Voie lactée n'est pas un système à l'équilibre. Or les modèles sont souvent construits avec l'hypothèse que la Galaxie est à l'équilibre.

Ces perturbations peuvent-elles avoir eu une influence sur l'origine du Système solaire ?

Avec les données du catalogue de *Gaia* sur les étoiles dans le voisinage du Soleil, Tomas Ruiz-Lara, de l'institut d'astrophysique des Canaries, en Espagne, et ses collègues ont étudié la distribution statistique des âges des astres et ont constaté des flambées d'étoiles à 5,7 milliards, 1,9 milliard et 1 milliard d'années. Ils ont comparé ces observations avec des modèles des passages de la galaxie du Sagittaire. Ils observent une concordance : chaque passage correspond à une flambée. En particulier, le Soleil s'est formé à l'époque du premier passage il y a près de 5 milliards d'années. Les chercheurs se demandent donc si cette collision galactique n'est pas à l'origine du Système solaire. Une piste à confirmer, qui montre que la Voie lactée est loin de nous avoir révélé tous ses secrets. ■

Propos recueillis par Sean Bailly

BIBLIOGRAPHIE

T. Ruiz-Lara et al., **The recurrent impact of the Sagittarius dwarf on the star formation history of the Milky Way**, *Nature Astronomy*, en ligne, 25 mai 2020.

E. Poggio et al., **Evidence of a dynamically evolving Galactic warp**, *Nature Astronomy*, vol. 4, pp. 590-596, 2020.

A. Helmi et al., **The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk**, *Nature*, vol. 563, pp. 85-88, 2018.

T. Antoja et al., **A dynamically young and perturbed Milky Way disk**, *Nature*, vol. 561, pp. 360-362, 2018.

K. Johnston, **Les fossiles de la Voie lactée**, *Pour la Science*, n° 453, juillet 2015.

Accident nucléaire

Comment contenir le cœur fondu d'un réacteur ?

CONTEXTE

> Les accidents de centrales nucléaires les plus graves sont ceux qui conduisent à la fusion du cœur du réacteur. Dans ces situations extrêmes, il faut éviter au maximum les rejets radioactifs dans l'environnement. Aujourd'hui, la stratégie à mettre en œuvre pour y parvenir est élaborée dès la

conception de l'installation. L'une des approches consiste à stabiliser le cœur fondu à l'intérieur même de la cuve. Un projet européen coordonné par l'IRSN depuis 2015 a étudié dans quelles conditions et pour quels réacteurs cette stratégie est adaptée.

Cahier partenaire
réalisé avec

IRSN

www.irsn.fr

En cas d'accident grave dans une centrale nucléaire, le mélange hautement radioactif de combustible et de matériaux fondus peut percer la cuve en acier du réacteur.

Des modélisations fines de l'évolution thermochimique de ce mélange et des analyses de la résistance mécanique de la cuve évaluent les conditions à respecter pour l'éviter.

Three Mile Island, Tchernobyl, Fukushima Daiichi, l'histoire a montré la réalité du risque d'un accident grave dans une centrale nucléaire. Si pour les premières générations de réacteurs ce risque n'avait pas été anticipé, il est aujourd'hui pris en compte dès la conception de l'installation. Ainsi, tout concept de nouveau réacteur de troisième génération s'accompagne d'une stratégie pour limiter les conséquences d'un accident grave. Mais qu'est-ce qu'un accident grave ?

Lorsqu'une anomalie significative est détectée dans une centrale nucléaire (eau trop chaude, fuite, surpression, etc.), le système d'arrêt automatique du réacteur se déclenche et interrompt la réaction nucléaire. Mais au cœur du réacteur, les produits radioactifs issus de la fission du combustible

continuent à se désintégrer en produisant de la chaleur. Pour éviter la surchauffe qui conduirait à la fusion du combustible, des systèmes de refroidissement de secours par injection d'eau prennent le relais. Jusque-là, la situation est sous contrôle. Mais si ces systèmes dysfonctionnent comme à Fukushima Daiichi à cause du séisme et du tsunami, la température monte, le combustible et les structures métalliques internes se dégradent et fondent. Il se forme alors dans la cuve en acier du réacteur un « bain de corium » – mélange de combustible, de gaines métalliques qui l'enveloppent et de débris de structures fondus – qui dépasse les 2 500 degrés Celsius. Ce bain risque de percer la cuve en la faisant fondre. Tout doit être fait pour stabiliser ce corium et l'empêcher de dégrader l'enclume de confinement, ultime barrière avant les rejets dans l'environnement.