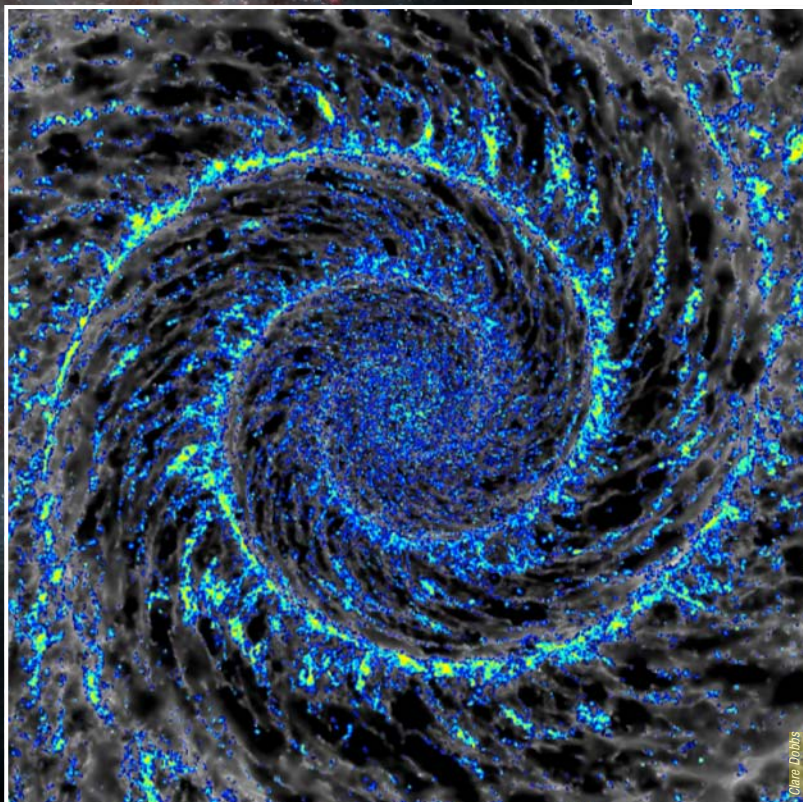




1. LA GALAXIE DU TOURBILLON (à gauche) est une galaxie spirale à deux bras. Les amas d'étoiles (en rouge) et les nuages de gaz (les régions sombres) coïncident. Pour étudier le lien entre eux, les astrophysiciens font appel à des simulations numériques (ci-dessous). Ces simulations reproduisent assez bien les structures observées.



MASA, ESA, S. Beckwith (STScI), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Les galaxies spirales sont parmi les objets les plus élégants de l'Univers. Leur aspect géométrique repose sur de longs bras de gaz et d'étoiles qui s'enroulent suivant un motif régulier. Mais cette structure n'est pas figée : les galaxies spirales sont en constante évolution. Tandis qu'elles tournent sur elles-mêmes comme des moulins à vent, leurs bras se lovent, s'étirent et se déchirent. Les étoiles qui les constituent ne sont pas plus immuables : elles naissent, vieillissent et meurent en se refroidissant ou en explosant en supernova.

L'évolution de la galaxie et celle des étoiles sont étroitement liées, mais il était jusqu'à présent difficile d'étudier simultanément la dynamique à grande échelle et celle des processus qui régulent la vie des étoiles. Cet obstacle est en voie d'être surmonté grâce à la puissance des nouveaux supercalculateurs, qui permet aux astronomes de réaliser des simulations numériques détaillées de la formation des étoiles au sein d'une galaxie. Il en résulte une compréhension sans précédent de la vie des galaxies spirales.

Le Système solaire est situé sur un bras de la Voie lactée, à 28 000 années-lumière du centre galactique. Ainsi, nous voyons notre galaxie par la tranche et il est difficile d'en déterminer la forme. La vision moderne de la Galaxie s'est forgée progressivement à partir de 1610, lorsque Galilée a pointé sa lunette astronomique vers la traînée blanchâtre qu'est la Voie lactée et a compris qu'elle est constituée d'étoiles. Ce n'est qu'au XVII^e siècle que l'astronome anglais Thomas Wright et le philosophe allemand Emmanuel

Kant ont avancé l'idée que la Voie lactée est un disque d'étoiles en rotation. Au début du XX^e siècle, l'astrophysicien américain Harlow Shapley contribua à mesurer les dimensions de la Galaxie et la position du Soleil dans cette structure. Il participa aussi dans les années 1920 au grand débat sur la nature des «nébuleuses» : s'agissait-il d'objets extragalactiques à l'image de la Voie lactée ? La question a été tranchée grâce aux travaux d'Edwin Hubble qui, en observant un certain type d'étoiles dans ces nébuleuses, a montré qu'elles étaient trop lointaines pour appartenir à la Voie lactée.

Avec l'amélioration des techniques, les astronomes ont pu observer en détail ces galaxies et les classer en fonction de leur morphologie : les galaxies spirales (telle la Voie lactée, dont la structure n'a été mise en évidence qu'en 1953), les galaxies elliptiques et les galaxies irrégulières (voir la figure 2). Celles qui nous intéressent ici sont les galaxies spirales, elles-mêmes subdivisées en spirales à la structure dite régulière, avec typiquement deux bras symétriques, et d'autres avec plus de bras ou des bras courts et irréguliers.

Les connaissances sur les galaxies spirales sont surtout observationnelles et certains aspects restent mal connus. Par exemple, les astronomes se sont intéressés à la nature des bras spiraux. Si toute la matière de la galaxie est dans les bras et que les régions proches du centre tournent plus vite que les parties périphériques, un problème émerge : les bras s'enroulent trop vite et disparaissent en quelques révolutions galactiques. En 1964, les astronomes américains d'origine chinoise Frank Shu et Chia-Chiao Lin suggèrent que la galaxie est un disque de matière parcouru par des ondes qui la condensent dans certaines régions, formant les bras. Ce phénomène de propagation d'ondes de densité est similaire à ce qu'on observe dans les embouteillages de véhicules.

Le gaz galactique est la matière première des étoiles et les observations montrent que c'est surtout dans le gaz condensé des bras que se forment les nouvelles étoiles. Mais ces données ne suffisent pas pour décrire avec précision la dynamique du gaz galactique ou pour déterminer combien d'étoiles se forment dans la Galaxie chaque année et, surtout, par quels mécanismes.

En outre, il ne se forme quasiment pas de nouvelles étoiles dans les galaxies elliptiques. Le phénomène est spécifique aux galaxies spirales avec un processus cyclique : le gaz de la galaxie se condense en nuages dans les bras, ces nuages s'effondrent pour former des étoiles et, par le biais des supernovæ et des vents stellaires, les étoiles réinjectent de la matière dans le disque galactique.

Depuis une dizaine d'années, les astronomes ont développé des simulations numériques pour étudier le lien entre la dynamique galactique et la formation des

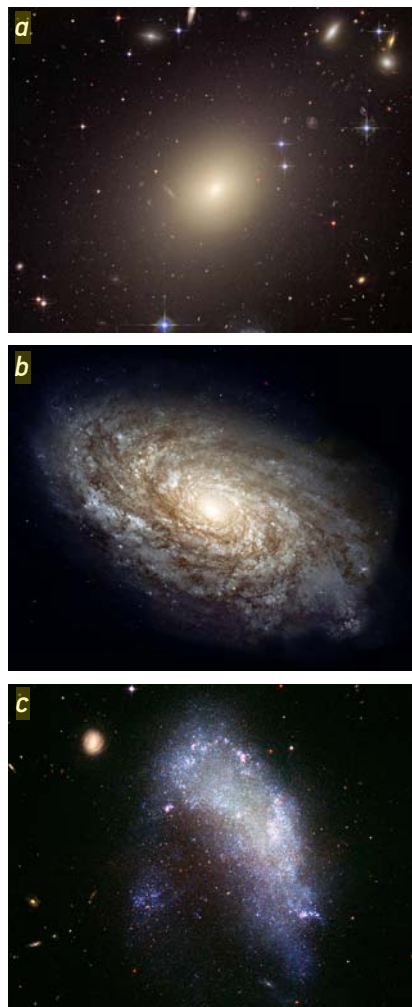
étoiles, mais cette approche a été difficile à mettre en œuvre. En effet, les modèles de galaxies doivent prendre en compte les processus physiques qui gouvernent les gaz et les étoiles aux différentes échelles pertinentes : le diamètre d'une étoile est de l'ordre de 10^6 à 10^9 kilomètres, tandis que celui d'une galaxie spirale telle que la Voie lactée est de quelque 10^{18} kilomètres.

Une façon de simplifier le problème consiste à le hiérarchiser : examiner d'abord la formation des nuages de gaz, puis zoomer sur un nuage pour y étudier la naissance des étoiles. C'est l'approche que nous avons suivie avec mes collègues.

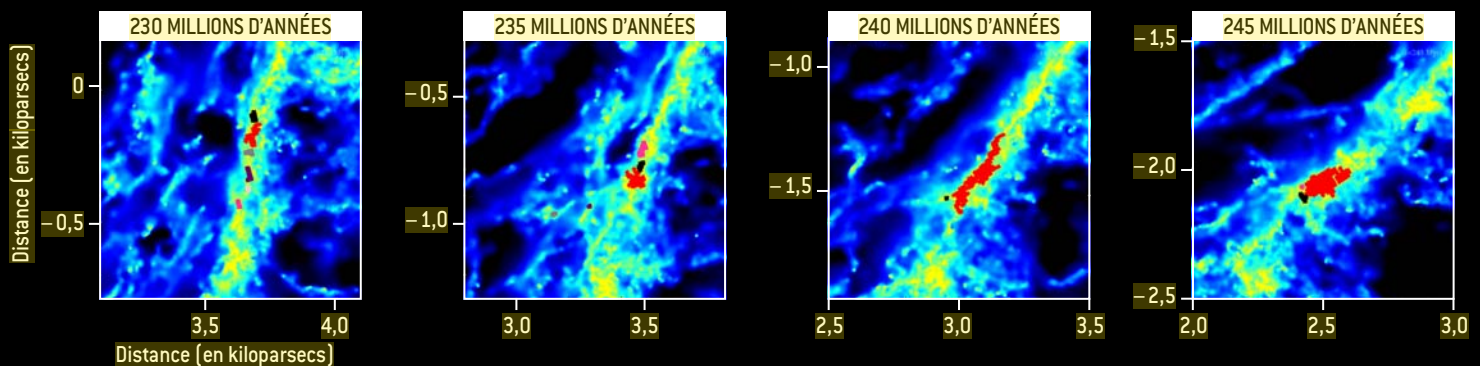
L'une de nos simulations (voir la figure 1, à droite) montre les régions où le gaz est le plus dense et forme des nuages berceaux des étoiles. L'aspect général est très proche de la structure de la galaxie spirale du Tourbillon (M51). Cet outil nous a permis de mieux comprendre la formation des étoiles dans une galaxie spirale. Je présenterai ici quelques aspects de ces simulations numériques et certains résultats de cette étude.

Formation des nuages

La première étape de la simulation est de reproduire la dynamique du gaz. Le code numérique que nous avons utilisé, nommé SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*, Hydrodynamique à lissage adaptatif), est capable de modéliser des écoulements et d'inclure les effets de la gravité. Ce programme traite le gaz comme un fluide, puis divise le fluide en un ensemble d'éléments discrets, ou particules. Les propriétés d'une particule dépendent de ses voisines, et peuvent varier en fonction des conditions locales, telles que la densité en particules. Cette méthode est bien adaptée à notre problème, car elle



2. LES GALAXIES sont classées en fonction de leur morphologie : les galaxies elliptiques (a), les galaxies spirales (b) ayant deux bras ou plus, et les galaxies irrégulières (c) sans structure discernable.



peut décrire des phénomènes couvrant de nombreux ordres de grandeur.

Une galaxie est constituée majoritairement de matière noire (substance invisible, de nature inconnue, qui ne se manifeste que par ses effets gravitationnels) et d'étoiles. Pour économiser les calculs, leur influence dans la galaxie est implicitement incluse dans les modèles en utilisant un potentiel gravitationnel simple. Seule la dynamique du gaz est modélisée dans notre simulation.

La composition du gaz n'est pas uniforme. Les étoiles ne naissent que dans des nuages où le gaz est relativement froid (environ 10 kelvins) et dense (de l'ordre de 100 particules par centimètre cube). Parmi ces nuages, les plus massifs sont les nuages moléculaires géants, qui contiennent des molécules (principalement de dihydrogène, ou H_2). D'autres parties du milieu interstellaire sont par exemple constituées de gaz ionisé.

La gravité est la principale force en jeu dans la dynamique du gaz, mais il faut prendre en compte d'autres processus pour obtenir une galaxie très structurée, où le gaz s'organise en nuages moléculaires denses qui correspondent étroitement aux nuages géants réels.

Au sein d'un nuage, le gaz peut subir de nombreuses contraintes. L'existence d'une pression autorise la propagation d'ondes de choc. Lors des collisions entre différentes régions de gaz, ou entre petits nuages, les molécules perdent de l'énergie et de la vitesse, et le gaz émet un rayonnement. De ce fait, la température du gaz diminue à quelques dizaines de kelvins et conduit à la formation de nuages moléculaires géants. Par ailleurs, les instabilités gravitationnelles augmentent localement

la densité dans un nuage; il s'ensuit des collisions plus fréquentes et un refroidissement plus efficace.

Nous avons effectué des simulations démontrant que les instabilités gravitationnelles influent sur la structure du gaz pour les nuages les plus denses, alors que les processus de collision entre nuages dominent pour des densités plus faibles. Dans la simulation, l'essentiel de la structure est le résultat de collisions entre nuages, mais les nuages les plus gros (représentés en jaune) sont formés par autogravitation.

La rétroaction stellaire a une action inverse de celle de la gravité sur la répar-

grande densité en gaz. Ces résultats confirment que les bras spiraux sont des milieux plus favorables à la formation des étoiles.

Nos simulations permettent de visualiser la formation des éperons. L'onde de densité qui forme les bras se déplace plus lentement que les étoiles ou les nuages denses qui se sont formés. Mais du fait de la rotation différentielle – la matière plus proche du centre galactique tourne plus vite que celle plus éloignée –, les nuages de gaz sont cisailés et étirés, ce qui crée les éperons entre les bras.

Nos simulations semblent reproduire plutôt fidèlement la dynamique des nuages de gaz. Nous avons commencé à les exploiter pour étudier le lien avec la formation des étoiles.

Les observations indiquent que la plupart des étoiles se sont formées lorsque la galaxie s'est constituée, ou peu de temps après.

Cela est vrai pour les galaxies elliptiques et spirales. Ainsi, la plupart des étoiles de la Voie lactée datent de sa naissance il y a environ 12 milliards d'années. Le rythme de formation stellaire était alors plus élevé qu'aujourd'hui. Ce qui est surprenant, c'est que la Voie lactée et d'autres galaxies spirales forment encore des étoiles. D'après les dernières estimations, l'équivalent d'une étoile telle que le Soleil se forme chaque année dans la Galaxie. Mais ce chiffre est

LES ÉTOILES FORMÉES

ont une action inverse de celle de la gravité sur la répartition du gaz : leur vent de particules et leur rayonnement dispersent ce gaz.

tion du gaz dans la galaxie simulée : le vent, le rayonnement ionisant des étoiles jeunes, la pression de radiation (la pression exercée par les photons des étoiles sur la matière environnante) et les explosions de supernovae dispersent le gaz et le réchauffent.

Grâce à la prise en compte de ces effets, la galaxie simulée présente de nombreux points communs avec la galaxie M51 (voir la figure 1). Dans les deux galaxies, les nuages moléculaires et la formation stellaire sont concentrés dans les bras spiraux. On observe aussi des structures fines entre les bras, nommées éperons. Nous avons montré que les collisions de nuages sont peu fréquentes dans les régions entre les bras – ou dans les galaxies sans bras spiraux. Les instabilités gravitationnelles sont aussi renforcées dans les bras spiraux en raison de leur plus

3. CETTE FRISE montre l'évolution d'un nuage de gaz dans la simulation. Les dates sont données par rapport au début de la simulation. Le gaz se condense et forme un nuage (en rouge). Ce dernier se déplace et se déforme à cause des forces de cisaillement. Les étoiles qui naissent dans le nuage émettent un vent de particules et un rayonnement qui dispersent le nuage.

