

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-

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.

tition 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

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

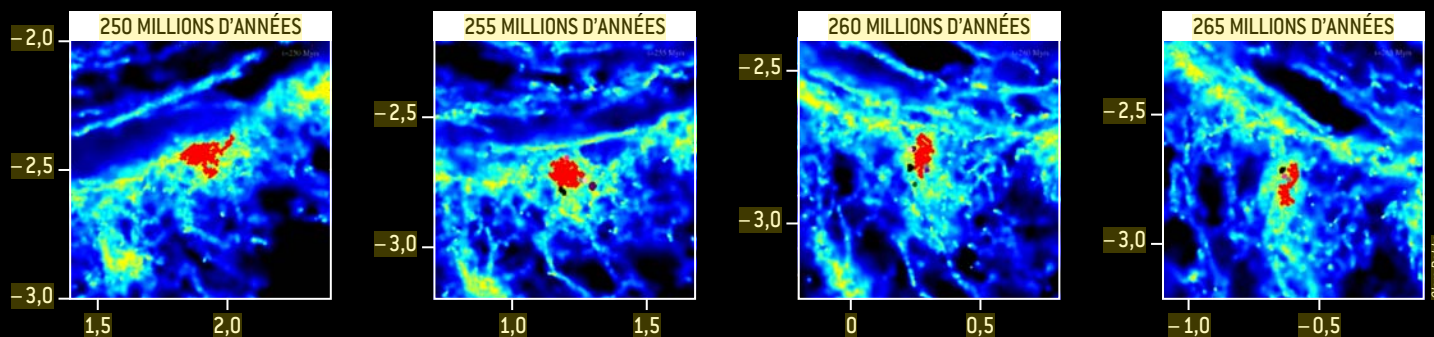
Nos simulations permettent de visualiser la formation des éperons. L'onde de densité qui forme les bras se déplace plus lentement que les étoiles ou les nuages denses qui se sont formés. Mais du fait de la rotation différentielle – la matière plus proche du centre galactique tourne plus vite que celle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

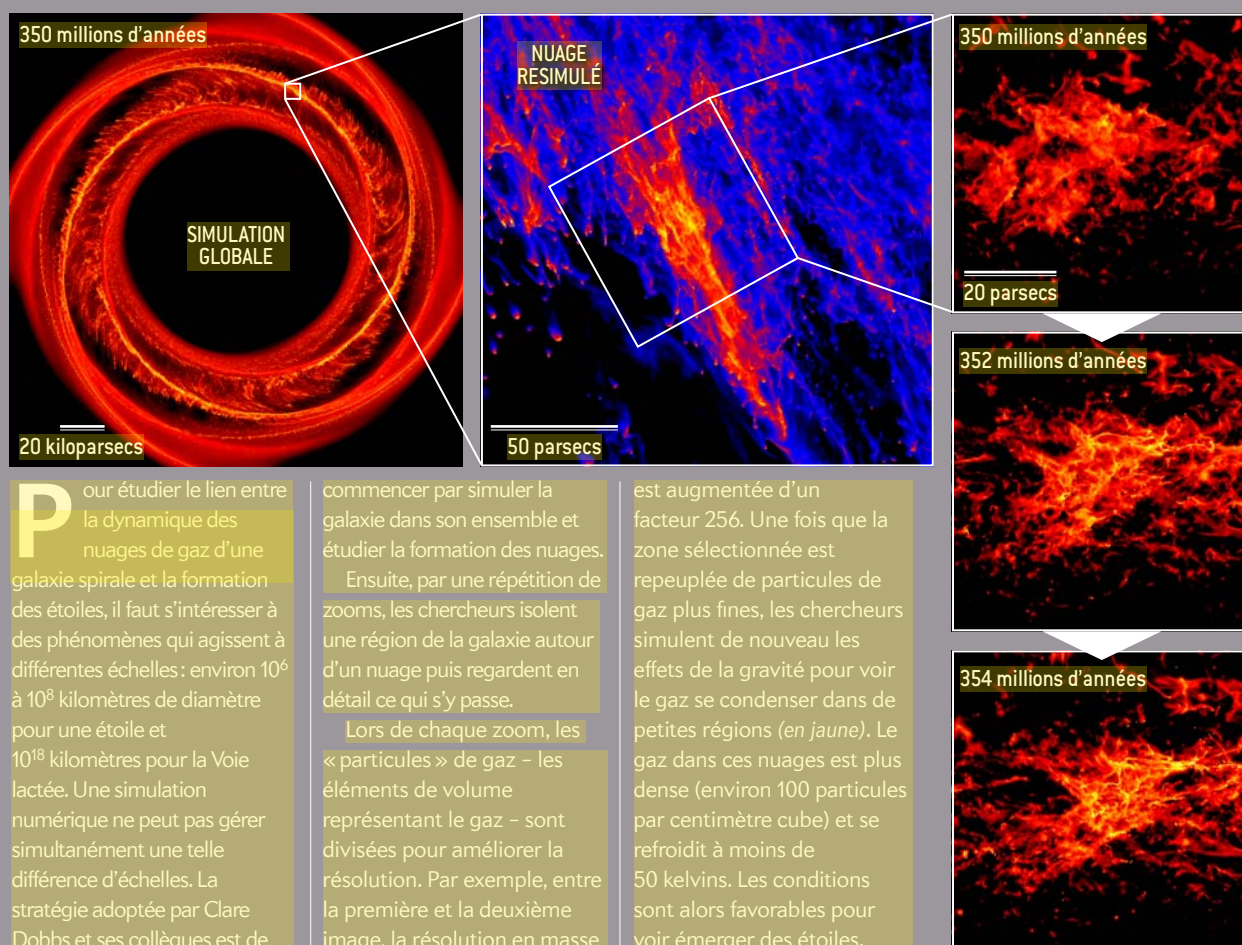
Les observations indiquent que la plupart des étoiles se sont formées lorsque la galaxie s'est constituée, ou peu de temps après.

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

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.



ÉTUDIER UNE GALAXIE À DIFFÉRENTES ÉCHELLES



Pour étudier le lien entre la dynamique des nuages de gaz d'une galaxie spirale et la formation des étoiles, il faut s'intéresser à des phénomènes qui agissent à différentes échelles : environ 10^6 à 10^8 kilomètres de diamètre pour une étoile et 10^{18} kilomètres pour la Voie lactée. Une simulation numérique ne peut pas gérer simultanément une telle différence d'échelles. La stratégie adoptée par Clare Dobbs et ses collègues est de

commencer par simuler la galaxie dans son ensemble et étudier la formation des nuages.

Ensuite, par une répétition de zooms, les chercheurs isolent une région de la galaxie autour d'un nuage puis regardent en détail ce qui s'y passe.

Lors de chaque zoom, les « particules » de gaz – les éléments de volume représentant le gaz – sont divisées pour améliorer la résolution. Par exemple, entre la première et la deuxième image, la résolution en masse

est augmentée d'un facteur 256. Une fois que la zone sélectionnée est repeuplée de particules de gaz plus fines, les chercheurs simulent de nouveau les effets de la gravité pour voir le gaz se condenser dans de petites régions (en jaune). Le gaz dans ces nuages est plus dense (environ 100 particules par centimètre cube) et se refroidit à moins de 50 kelvins. Les conditions sont alors favorables pour voir émerger des étoiles.

une petite fraction du nombre d'étoiles qui se formeraient si les nuages moléculaires géants se transformaient en étoiles avec un rendement parfait. Quel est le processus qui empêche le gaz des galaxies spirales de s'effondrer pour donner des étoiles ? La rétroaction stellaire.

À l'exception des supernovæ, les processus de vent stellaire, d'ionisation et de pression de radiation ont lieu pendant toute la vie d'une étoile massive. Ils modulent la formation stellaire en injectant dans le milieu interstellaire de l'énergie, et dans certains cas de la matière, qui s'oppose à la gravité, au refroidissement et à l'effondrement des nuages. L'énergie injectée est proportionnelle au nombre d'étoiles dont on prédit la formation à partir des nuages de gaz moléculaire qui atteignent une certaine densité.

Si l'on effectue les simulations en doublant la fréquence de formation d'étoiles, la quantité d'énergie ajoutée au milieu inters-

tellaire est aussi doublée, ce qui s'oppose à la formation des nuages. Ainsi, la compétition entre l'effondrement gravitationnel des nuages, qui forme des étoiles, et la rétroaction des étoiles, qui dissipe les nuages, évolue vers un équilibre. Le taux de formation stellaire diffère d'un facteur 100 selon que l'on prend la rétroaction en compte ou pas. Une telle régulation explique pourquoi les galaxies spirales produisent encore des étoiles aujourd'hui.

La vie d'un nuage

Une question qui s'est posée durant nos travaux est la durée de vie de ces nuages moléculaires. Ces milieux sont essentiels pour la formation des étoiles, mais s'agit-il de structures stables à longue durée de vie ? Dans les premiers modèles du milieu interstellaire, on supposait généralement que c'était le cas : les nuages étaient capables de se maintenir des dizaines de millions

d'années. La gravitation assurait la cohésion des nuages moléculaires géants, mais les effets combinés de la turbulence et de la rotation les empêchaient de s'effondrer sur eux-mêmes, d'où leur équilibre.

Avec les progrès des observations, on a montré que les nuages présentent généralement une structure allongée, ce qui n'est pas caractéristique des objets à l'équilibre. De plus, plusieurs études récentes suggèrent que la durée de vie de ces nuages pourrait être courte : les étoiles se formeraient rapidement, puis perturberaient leur nuage de naissance par les processus de rétroaction stellaire.

Ces découvertes constituent un test pour nos simulations. Dans ces dernières, pour déterminer la durée de vie des nuages, il faut d'abord identifier ces structures, c'est-à-dire définir une valeur minimale de la densité locale à partir de laquelle on peut parler de nuage. La difficulté est ensuite de suivre le déplacement de ces nuages

Clare Dobbs