

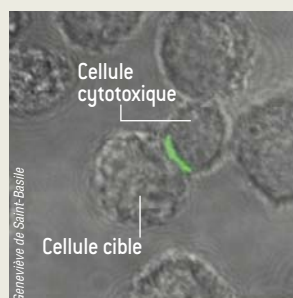
Du trafic à la réponse immunitaire

Pour exercer leur fonction, certaines cellules de l'organisme doivent sécréter à un moment et un endroit précis des constituants contenus dans des vésicules. C'est le cas des neurones du cerveau qui, en réponse à un stimulus, communiquent en sécrétant des neurotransmetteurs dans leur zone de contact – la synapse neurologique.

C'est aussi le cas des cellules tueuses de notre système immunitaire, les lymphocytes cytotoxiques, dont le rôle est d'éliminer les cellules infectées par un virus ou tumorales. Le lymphocyte tueur détecte la cellule indésirable et organise, dans leur zone de contact, une synapse immunologique. Des granules contenant des protéines cytotoxiques (en vert) sont transportés vers cette zone et déversent leur chargement dans la synapse, ce qui concentre l'attaque sur la cellule à éliminer.

L'utilisation de cette arme nécessite une cascade d'événements dont chaque étape est régulée par un effecteur (une protéine) précis. L'absence de l'un ou l'autre des effecteurs bloque la machinerie de sécrétion et conduit à une dérégulation du système immunitaire nommée syndrome hémophagocytaire. Au cours de ce syndrome, la réponse immunitaire, incapable d'éliminer le danger, s'emballe et finit par envahir et détruire les organes, ce qui peut conduire au décès en l'absence de traitement.

C'est l'étude des formes héréditaires de ce syndrome qui a permis, ces dernières années, d'identifier les effecteurs indis-



pensables à la sécrétion des granules. Par une approche génétique des patients, quatre acteurs critiques ont été identifiés, intervenant dans le transport et l'amarrage des granules à la synapse, leur préparation à la fusion et la fusion elle-même. Chacun avait son pendant dans

la machinerie qui régule la sécrétion des neurotransmetteurs à la synapse neurologique, ce qui a facilité la compréhension des mécanismes en jeu dans la synapse immunologique.

Certaines différences existent cependant, tel le fait que la synapse immunologique soit transitoire et puisse se former à un endroit quelconque de la membrane du lymphocyte, alors que la synapse neurologique est fixe. Il en résulte que la sécrétion y est plus lente. Il reste à déterminer si d'autres processus liés à la synapse neurologique existent pour la synapse immunologique, tel le recyclage des vésicules ou l'adaptation de la sécrétion à l'importance de la stimulation.

– **Geneviève de Saint-Basile**
Inserm 1163/Institut Imagine, Paris V,
Hôpital Necker-Enfants malades

le trafic vésiculaire

■ Identifier les paramètres physico-chimiques sous-tendant les processus de transport. Tous les organismes vivants dépendent de lois physico-chimiques qui gouvernent les échanges moléculaires et les mécanismes de base des cellules et tissus. Des études récentes ont par exemple mis en évidence le rôle essentiel (et inattendu il y a encore dix ans) de la composition lipidique, de la courbure et de la tension des membranes dans la formation des vésicules de transport. Le rôle de ces paramètres au cours d'autres étapes du transport, telles la fission ou la fusion des vésicules, reste très mal connu. Ces études seront indispensables pour parvenir à une description quantitative et intégrée du transport.

■ Comprendre les liens entre le transport et d'autres processus cellulaires essentiels tels que l'activation des voies de signalisation, la migration ou la division. Le transport intracellulaire et la dynamique membranaire sont couplés à toutes ces grandes fonctions de la cellule. En témoignent les études montrant l'importance de la dynamique des endomembranes (telles que l'appareil de Golgi ou les endosomes, les vésicules transportant dans la cellule les composants externes qu'elle a « avalés ») et de leur topologie dans la signalisation, ou celle de la sécrétion et du recyclage des composants de la surface pendant la migration. Beaucoup reste à faire pour intégrer tous ces processus.

■ Comprendre le rôle de la dérégulation du transport intracellulaire dans de nombreuses pathologies. Un nombre croissant d'études montre un rôle direct de la dérégulation du transport intracellulaire dans des pathologies telles que le cancer, la maladie d'Alzheimer ou encore le diabète. Un défi majeur pour le futur sera d'identifier, parmi les centaines de protéines régulant le transport intracellulaire, celles qui constituent des cibles thérapeutiques potentielles.

■ EN VIDÉO



Les conférences et interviews des trois prix Nobel 2013 de physiologie et médecine :

James Rothman
<http://www.nobelprize.org/mediaplayer/index.php?id=1975>

Randy Schekman
<http://www.nobelprize.org/mediaplayer/index.php?id=1977>

Thomas Südhof
<http://www.nobelprize.org/mediaplayer/index.php?id=1986>

Du gaz galactique aux étoiles

Comment naissent les étoiles dans les nuages de gaz d'une galaxie spirale ? Des simulations numériques élucident le lien entre la dynamique de ces nuages et la formation des étoiles.

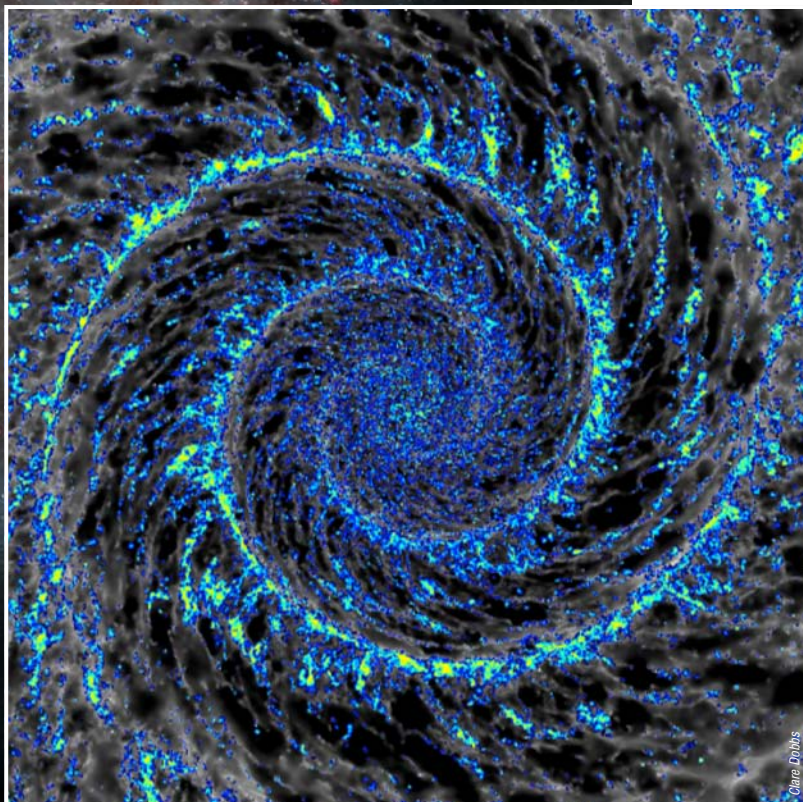
Clare Dobbs

L'ESSENTIEL

- Les étoiles se forment dans les nuages de gaz galactique denses.
- Les astrophysiciens utilisent des simulations numériques pour étudier le lien entre ces nuages et les étoiles.
- Les importantes différences d'échelles nécessitent d'étudier d'abord la formation des nuages avant de zoomer sur les étoiles.
- La dynamique des nuages est soumise à des forces antagonistes : la gravité condense le gaz et la rétroaction des étoiles, tel le vent stellaire, le disperse.



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.



NASA, 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

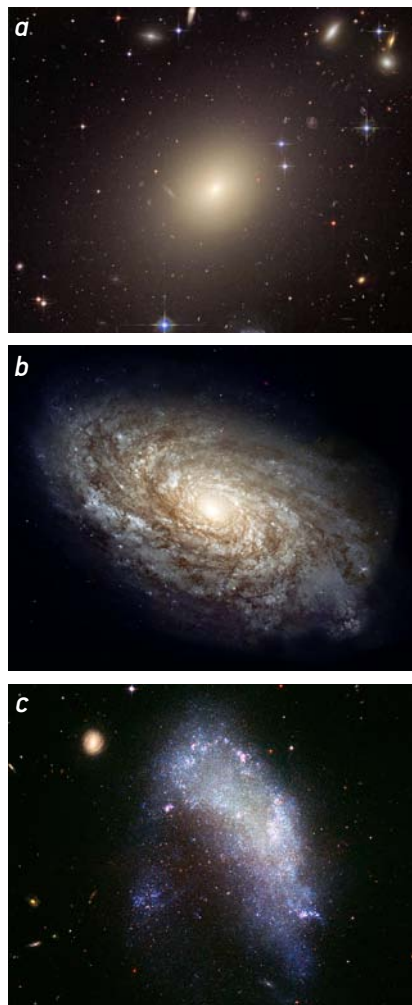
étoiles, mais cette approche a été difficile à mettre en œuvre. En effet, les modèles de galaxies doivent prendre en compte les processus physiques qui gouvernent les gaz et les étoiles aux différentes échelles pertinentes : le diamètre d'une étoile est de l'ordre de 10^6 à 10^9 kilomètres, tandis que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

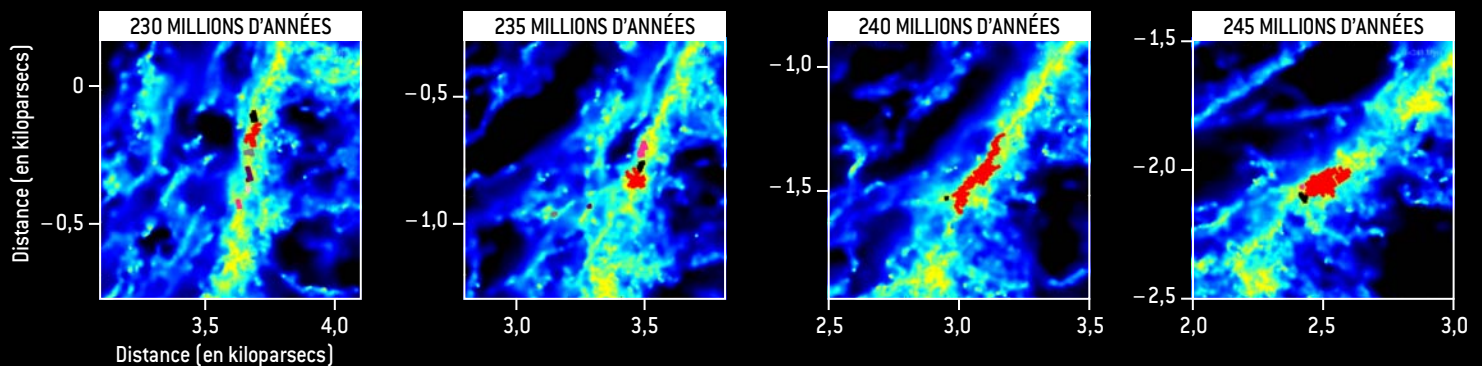
L'une de nos simulations (voir la figure 1, à droite) montre les régions où le gaz est le plus dense et forme des nuages berceaux des étoiles. L'aspect général est très proche de la structure de la galaxie spirale du Tourbillon (M51). Cet outil nous a permis de mieux comprendre la formation des étoiles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

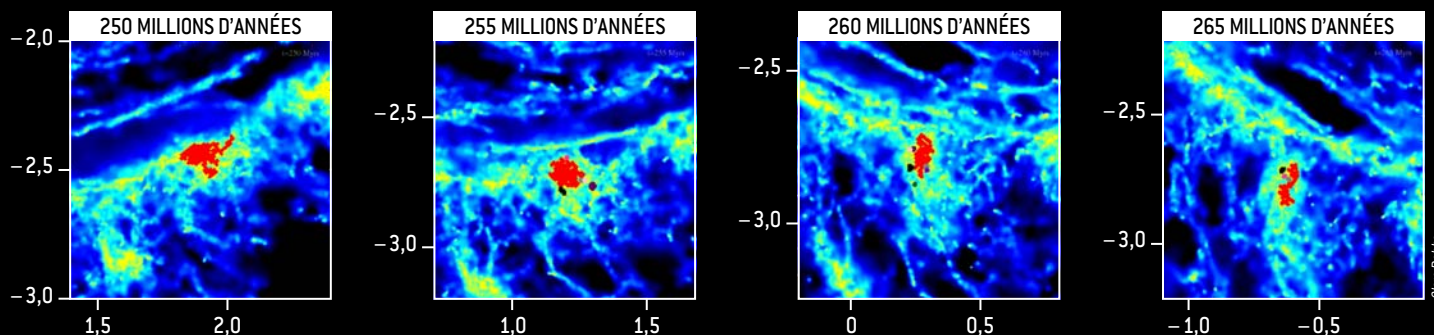
LES ÉTOILES FORMÉES

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

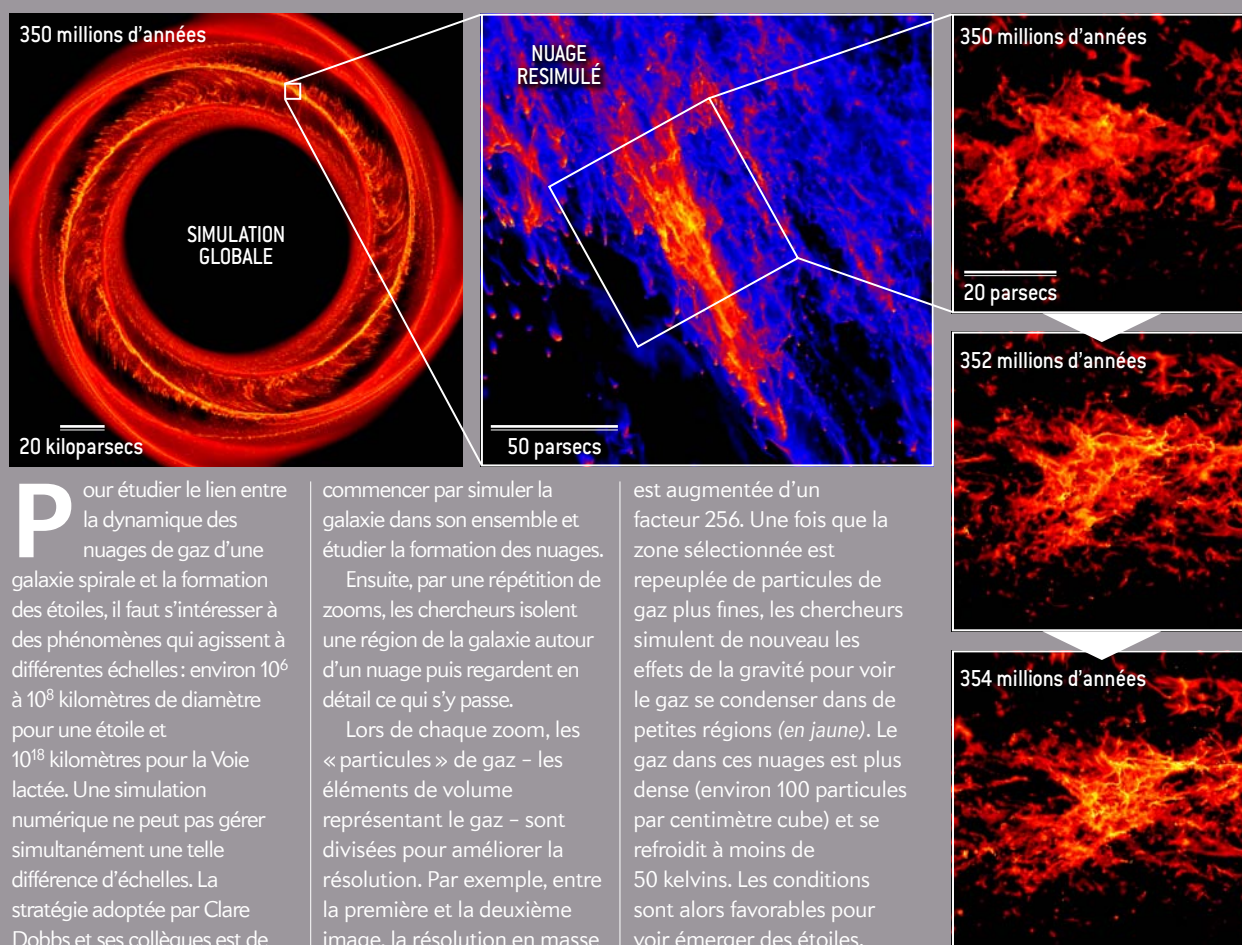
tition du gaz dans la galaxie simulée : le vent, le rayonnement ionisant des étoiles jeunes, la pression de radiation (la pression exercée par les photons des étoiles sur la matière environnante) et les explosions de supernovæ dispersent le gaz et le réchauffent.

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.



ÉTUDIER UNE GALAXIE À DIFFÉRENTES ÉCHELLES



Clare Dobbs

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

dans la galaxie et leurs déformations. Nos simulations numériques mettent en évidence leur évolution (voir la figure 3). On peut ainsi voir le gaz se condenser pour former un nuage qui, après une certaine durée, se dissout. Nos calculs montrent que la durée de vie des nuages n'est que de quelques millions d'années, en accord avec les observations récentes.

Les nuages sont détruits par les effets combinés du cisaillement (dû à la rotation différentielle) et de la rétroaction stellaire. Quelques-uns des nuages moléculaires géants, en particulier les plus massifs, ont des durées de vie plus longues.

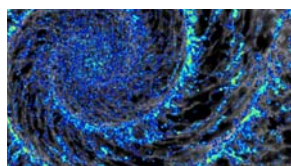
L'équilibre des forces qui assure la stabilité d'un nuage peut être étudié par une autre approche. Un énoncé général, le « théorème du viriel », suppose qu'un système est à l'équilibre si son énergie cinétique moyenne et son énergie potentielle sont égales. Dans le cas d'un nuage de gaz, l'énergie cinétique est déterminée par les vitesses des molécules du gaz, tandis que l'énergie potentielle est liée à l'auto-gravité du nuage. Si l'énergie potentielle domine,

■ L'AUTEUR

Clare DOBBS effectue ses recherches au Département d'astrophysique de l'Université d'Exeter, en Grande-Bretagne.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

■ EN VIDÉO



Les simulations animées de l'auteur : <http://empslocal.ex.ac.uk/people/staff/cld214/movies.html>

le nuage est en effondrement, si l'énergie cinétique domine, le nuage s'étiole. Nos simulations montrent que l'on est plutôt dans ce dernier cas. Ainsi, seules des régions locales dans les nuages vont s'effondrer et former des étoiles, mais les nuages dans leur ensemble ne s'effondrent pas.

L'état non lié, gravitationnellement, de la plupart des nuages contribue à expliquer le faible taux de formation stellaire dans les galaxies. En outre, si les grands nuages ne sont pas liés, ils peuvent facilement se dilater après avoir quitté les bras et former les éperons observés entre les bras de nombreuses galaxies. Les nuages liés par autogravité, en revanche, ont tendance à conserver des formes presque sphériques. La rétroaction stellaire explique en partie pourquoi les nuages ne sont pas liés. Elle est source de mouvements dans le milieu interstellaire, « soufflant » les nuages et augmentant leur dispersion. Certains nuages moléculaires géants de notre simulation sont liés, mais leurs courtes durées de vie suggèrent qu'ils s'effondrent rapidement, forment des étoiles et disparaissent. En l'absence de rétroaction,

les conférences

Entrée libre dans la limite des places disponibles

au Palais de la découverte

théma **Cap sur l'invisible**

Faut-il tuer le temps ?

> **mardi 7 octobre à 19h**

Débat exceptionnel sur la nature du temps, entre les fondateurs de la théorie de la gravitation quantique à boucles, Lee Smolin (Institut Perimeter, Canada) et Carlo Rovelli (Université de la Méditerranée, Marseille), animé par l'historien des sciences Michel Blay.

La structure des comètes, des hypothèses aux évidences

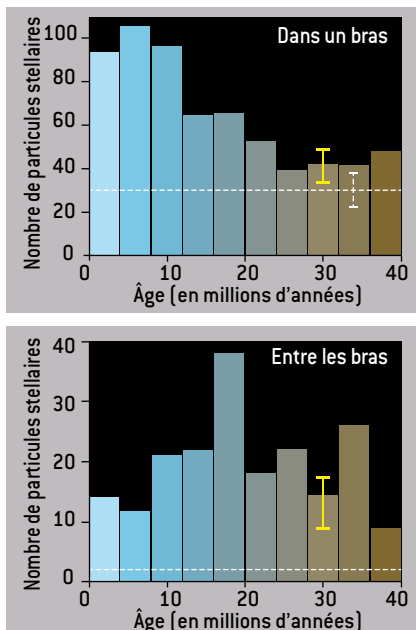
> **samedi 25 octobre à 15h**

Conférence de l'astrophysicienne Anny-Chantal Levasseur, à l'occasion de la mission Rosetta (Agence spatiale européenne), en route vers la comète Churyumov-Gerasimenko.

En partenariat avec

Avec le soutien de

programme complet sur palais-decouverte.fr



4. LA DISTRIBUTION DE L'ÂGE DES ÉTOILES d'un nuage diffère selon la position de celui-ci dans la galaxie. Les étoiles sont relativement plus jeunes dans un bras (*en haut*) qu'entre les bras (*en bas*), les nuages s'étant d'abord formés dans un bras avant de migrer.

les nuages sont pour la plupart liés, mais ils forment beaucoup trop d'étoiles.

Jusqu'à présent nous n'avons présenté que les résultats obtenus à l'échelle de la galaxie. Nous avons modélisé la formation et l'évolution des nuages moléculaires géants, mais, à de telles échelles, nous ne sommes pas en mesure de considérer les étoiles individuelles, ni même les amas de plusieurs étoiles. Nous ne pouvons pas obtenir mieux qu'une résolution de l'ordre de 100 masses solaires d'étoiles se formant à un moment donné. La rétroaction stellaire évoquée jusqu'à présent n'était incluse que de façon implicite dans la simulation.

Une façon d'explorer explicitement la formation stellaire consiste à zoomer sur une région de la galaxie. Dans cette approche, nous sélectionnons une zone, qui est simulée de nouveau en la repeuplant avec davantage de particules plus petites, de façon à augmenter la résolution (*voir l'encadré page 52*).

Par cette méthode, il est possible d'atteindre une valeur de 0,156 masse solaire par particule simulée. Un tel niveau de détail n'est pas encore tout à fait suffisant pour suivre la formation d'étoiles individuelles de type solaire, dont la masse correspond à moins de dix particules. Il est néanmoins possible de décrire une étoile d'au moins 11 masses solaires. Pour suivre la formation stellaire, nous insérons en général des



Clare Dobbs / PAWS team/IRAM/NASA HST / A. Rector (Université de l'Alaska)

« particules puits », qui remplacent 50 à 100 particules ordinaires, afin de représenter les endroits où des étoiles se sont formées. Ces insertions représentent soit des étoiles massives, soit de petits groupes d'étoiles.

Ces simulations à haute résolution aident à comprendre ce qui détermine la relation entre le taux de formation stellaire et la densité de gaz dans les nuages de la galaxie (ce qui correspond à la relation empirique dite de Schmidt-Kennicutt). Nous avons montré que les chocs entre nuages, liés aux plus grandes échelles galactiques, influent sur la quantité de nuages denses de gaz froid et que le nombre de ces nuages est lié à la production d'étoiles.

La rétroaction stellaire est indispensable pour obtenir des résultats corrects à cette échelle aussi. Si on ne la prend pas en compte, nous trouvons des taux de formation stellaire trop élevés par rapport aux taux observés et donnés par la relation de Schmidt-Kennicutt.

De la même façon que nous avons mesuré la durée de vie des nuages de gaz, nous pouvons estimer l'âge des étoiles dans un nuage moléculaire géant. La distribution de cet âge est liée à l'évolution du nuage. Par exemple, Lee Hartmann, de l'Université du Michigan, et ses collègues ont montré qu'une prédominance d'étoiles jeunes est un indicateur de la formation récente du nuage moléculaire.

Mais leurs calculs ne prenaient en compte que de petits nuages d'environ dix masses solaires. Notre simulation globale a permis d'examiner la distribution des âges des étoiles (en l'occurrence de particules stellaires représentant chacune environ 160 masses solaires de formation stellaire dans ces simulations) sur des nuages plus grands, et cela dans les bras, entre les bras et dans les régions périphériques de la galaxie.

Notre analyse statistique montre que la distribution des âges est différente dans les bras spiraux et entre eux (*voir la figure 4*). En effet, les nuages et les étoiles se forment dans les bras. Ces régions présentent une majorité d'étoiles jeunes. Comme l'onde de densité et les nuages ne se déplacent pas à la même vitesse, les nuages se retrouvent entre les bras après une période de migration. Les étoiles y sont donc plus anciennes, avec un âge moyen de 20 millions d'années.

La compréhension physique de la formation stellaire par les astronomes a

Une façon d'explorer explicitement la formation stellaire consiste à effectuer une opération de zoom et se concentrer sur une région de la galaxie.

beaucoup progressé grâce aux simulations numériques qui décrivent l'évolution du gaz et des étoiles au sein des galaxies. Nous commençons à montrer comment se constituent et évoluent les nuages moléculaires géants, et comment s'effectue la formation stellaire en leur sein.

Une vision globale de la galaxie

Cependant, ces simulations nécessitent des mois de calcul sur des superordinateurs. Il est donc impératif de simplifier les modèles pour optimiser le temps de calcul. Certains phénomènes ne sont pas pris en compte. Le champ magnétique galactique, par exemple, n'est pas considéré – un sujet de recherche important pour la suite, car il pourrait influencer sur la dynamique du gaz ionisé. Nous aimerions aussi ajouter à nos modèles des processus à grande échelle, comme les supernovæ et la rotation galactique. Par ailleurs, les simulations de galaxies considèrent des galaxies spirales régulières isolées, alors que la plupart de ces galaxies

interagissent avec d'autres galaxies, ce qui influe sur la dynamique et la formation des bras spiraux.

La naissance des étoiles dans une galaxie est un phénomène complexe résultant de la compétition de forces liées à la gravité, l'électromagnétisme et la physique nucléaire : de la matière diffuse s'agglomère et se condense en donnant des étoiles, qui produisent alors de l'énergie par fusion et des éléments lourds par fusion thermonucléaire, laquelle disperse la matière.

Nous commençons seulement à comprendre cet équilibre subtil qui n'est pas sans conséquence pour l'apparition de la vie. Sans la formation des étoiles et de leur disque environnant de matériau accrété, il n'y aurait pas de planètes. Ainsi, l'étude des galaxies peut aider à comprendre non seulement la formation des étoiles, mais aussi celle des planètes. En faisant le lien entre ces processus à diverses échelles, depuis les étoiles jusqu'aux nuages moléculaires géants et aux galaxies entières, notre vision de l'Univers gagne en clarté et en profondeur. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

C. L. Dobbs *et al.*,
The dependence of stellar age
distributions on giant molecular
cloud environment, *MNRAS*,
vol. 437, pp. L31-L35, 2014.

C. L. Dobbs et J. E. Pringle,
The exciting lives of giant
molecular clouds, *MNRAS*,
vol. 432, pp. 653-667, 2013.

C. Bertout, Étoile et disque
protoplanétaire, compagnons
de naissance,
Dossier Pour la Science, n° 64,
juillet-septembre 2009.

C. L. Dobbs, GMC formation
by agglomeration
and self-gravity, *MNRAS*,
vol. 391, pp. 844-858, 2008.

F. Combes, Des vagues
dans la mare galactique,
Dossier Pour la Science, n° 56,
juillet-septembre 2007.



LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

{ Partagez les savoirs }

Entrée gratuite

BAR DES SCIENCES

Dimanche 12 octobre - 17h : La matière cristalline sous toutes ses facettes

Café-Restaurant La Baleine — 47 rue Cuvier, Paris 5^e

COURS PUBLICS

Cycle : L'anthropologie de Buffon - principes et postérité

Jeudi 9 octobre – 18h : Milieux physiques et variétés humaines

Jeudi 23 octobre – 18h : Des variétés aux races humaines

C. Blanckaert, Historien des sciences, directeur de recherche au CNRS, Centre Alexandre Koyré

COLLOQUE

Dédié au Pr. Robert Barbault

Jeudi 30 octobre – de 9h à 18h : Pour que nature vive : la biodiversité

Grand Amphithéâtre du Muséum — 57 rue Cuvier, Paris 5^e

CONFÉRENCES

Cycle : Le trésor du Muséum

Lundi 20 octobre – 18h : Relations géosphère – biosphère

P. De Wever, professeur, Muséum

Lundi 27 octobre – 18h : Pourquoi étudier les météorites ?

B. Zanda, maître de conférences, Muséum

Lundi 3 novembre – 18h : La minéralogie : des profondeurs planétaires au corps humain

F. Guyot, professeur, Muséum

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 26 octobre - 15h : Conférenciers scientifiques

B. Parisi, et L. Anseaume

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

Au Jardin des Plantes

Détails sur jardindesplantes.net, dans "l'agenda du jardin"



David Ecker

Des appareils capables d'identifier rapidement presque n'importe quel pathogène sont en cours de développement. En les installant dans des hôpitaux répartis sur tout le territoire et en les interconnectant, on pourrait détecter et maîtriser les épidémies de façon plus précoce.



Détecter les épidémies plus vite et plus tôt

Jusqu'au début du XX^e siècle, la plupart des gens mouraient avant leur cinquantième anniversaire. Et les décès étaient principalement dus aux maladies infectieuses telles que la variole, la grippe ou la pneumonie.

Aujourd'hui, ces maladies ne tuent presque plus dans les pays développés, grâce à la découverte des antibiotiques et aux progrès dans les domaines de l'hygiène, de la nutrition et des vaccins. Cependant, elles pourraient bientôt causer à nouveau de multiples décès prématurés. L'une des raisons est l'émergence de nouveaux agents dangereux, tels le virus Ebola à l'origine de l'inquiétante épidémie de fièvre hémorragique qui sévit aujourd'hui en Afrique. Une autre raison est que de nombreux micro-organismes deviennent résistants aux médicaments disponibles, que l'industrie pharmaceutique ne remplace pas assez vite.

La prescription excessive d'antibiotiques est l'un des facteurs qui contribuent le plus

à ce problème, et elle est notamment due aux insuffisances des outils de diagnostic actuels. Ces derniers ne peuvent déterminer rapidement, dans le cas d'une maladie bactérienne, quelle souche spécifique est en cause (les bactéries sont les seuls organismes sensibles aux antibiotiques). Dans la plupart des cas, on utilise encore des méthodes anciennes, qui prennent plusieurs jours et qui nécessitent la multiplication préalable des bactéries pathogènes dans un milieu de culture.

Un retard dans le traitement d'un patient pouvant avoir de graves conséquences, les médecins parent souvent à toute éventualité en prescrivant de puissants antibiotiques à large spectre, c'est-à-dire efficaces contre une grande variété de bactéries. Cependant, chaque médicament sélectionne certaines souches résistantes. Leurs compétiteurs décimés, ces souches se multiplient de façon incontrôlée et contaminent d'autres personnes. De telles pratiques médicales

protègent un grand nombre de patients aujourd'hui, mais elles entraînent inévitablement l'émergence de bactéries plus résistantes aux antibiotiques.

La solution pourrait résider dans de nouveaux biocapteurs moléculaires en cours de développement. Ces dispositifs permettront aux médecins de déterminer rapidement le type d'infection (bactérienne ou non) et l'espèce de microbes en cause. De tels outils de diagnostic feront gagner un temps précieux en recherchant tous les pathogènes potentiels à la fois, au lieu de tester chaque micro-organisme l'un après l'autre. Mes travaux au sein de l'entreprise *Ibis Biosciences*, rattachée au groupe *Abbott*, posent les fondements d'un tel outil. D'autres entreprises cherchent à développer des produits similaires.

Ces appareils de diagnostic rapide sont proches d'une application commerciale et devraient être disponibles dans les centres médicaux d'ici quelques années. Nous