

L'AUTEUR



Steven STAHLER est astrophysicien théoricien à l'Université de Californie

à Berkeley (États-Unis).

L'amas de la nébuleuse d'Orion

Aussi nommé amas du Trapèze, il est situé à 1 500 années-lumière au sein de la nébuleuse d'Orion, une pouponnière stellaire où se forment de nombreuses étoiles.

L'amas est de type association OB. Il contient 2 000 petites étoiles, surtout de type T Tauri, et quatre étoiles massives de types O et B.

Le rayonnement ultraviolet émis par les étoiles O et B ionise la poussière et le gaz, qui brillent dans l'infrarouge.



NASA/ESA/ESA/ESA

Une après-midi, nous faisons une pause-café quand l'embryon d'une réponse me vint à l'esprit. Tous les amas se seraient formés selon les mêmes principes, soumis aux mêmes forces. La variation d'un unique paramètre conduirait aux différents types d'amas. La masse du nuage précurseur, à l'origine de l'amas, déterminerait la forme et les propriétés du groupe d'étoiles. Il m'a fallu près de deux décennies pour réunir les preuves de cette intuition. Dans cet article, je raconterai comment l'observation minutieuse des différents amas et des simulations numériques complexes m'ont permis de développer une théorie de la naissance des groupes d'étoiles.

Nuageux avec possibilité d'étoiles

Quand j'ai commencé ces travaux, les astronomes savaient plutôt bien comment les étoiles se forment, et ils avaient identifié plusieurs types d'amas où naissent les astres. Les étoiles se forment dans des pouponnières stellaires au sein de vastes nuages, dits moléculaires parce qu'ils sont surtout composés de molécules d'hydrogène, et de traces d'autres éléments et de poussière. Chacun de ces nuages exerce une attraction gravitationnelle non seulement sur son environnement, mais aussi sur les différentes régions internes. Ce phénomène amorce la condensation des régions riches en gaz et en poussière, ce qui conduit à la formation de proto-étoiles. Un nuage peut ainsi engendrer un amas contenant entre une dizaine et plusieurs milliers d'étoiles.

Il existe cinq types principaux d'amas, qui se distinguent par leur âge ainsi que par le nombre et la densité d'étoiles qu'ils contiennent. Les groupes stellaires les plus jeunes, les amas enfous, se trouvent dans des nuages tellement épais que la lumière émise par les étoiles est complètement absorbée. Nous ne détectons que le rayonnement infrarouge de la poussière chauffée par ces étoiles. La structure détaillée de ces amas primitifs reste mystérieuse.

Les amas globulaires, en revanche, constituent les groupes stellaires les plus anciens. Ils datent des débuts de l'Univers et peuvent contenir jusqu'à un million d'étoiles très proches les unes des autres. Les nuages qui leur ont donné naissance ont disparu, et les étoiles qui y résident sont parfaitement visibles. Mais les amas

globulaires sont relativement éloignés du disque de la Voie lactée. À cause de la distance, ils sont eux aussi difficiles à étudier en détail.

Pour des raisons pratiques, j'ai limité mon étude aux trois types d'amas présents dans le disque de la Voie lactée, donc les plus faciles à observer. Le type d'amas le moins dense en étoiles est nommé « association T », car il est surtout constitué du type le plus courant d'étoiles jeunes : des T Tauri. Chaque association T contient jusqu'à plusieurs centaines de ces étoiles, lesquelles ne sont pas totalement masquées par le nuage précurseur qui les entoure. Les étoiles des associations T ne restent pas ensemble très longtemps : les amas de ce type les plus âgés que l'on connaisse ont environ cinq millions d'années – un battement de cils à l'échelle des temps cosmiques.

Dans les associations T, la masse initiale du nuage de gaz est bien plus importante que celle des étoiles formées. Cela expliquerait la courte vie de ces amas. En effet, comme la masse détermine l'intensité de la force gravitationnelle – plus la masse est importante, plus l'attraction gravitationnelle est intense –, c'est le nuage qui maintient la cohésion de l'amas dans ce cas et non l'attraction mutuelle des étoiles. Quand le nuage se disperse, les étoiles ne sont plus maintenues ensemble et se détachent progressivement. Or les astronomes pensent que les vents stellaires (des jets de gaz propulsés avec force par les étoiles) finissent par chasser le nuage précurseur de l'association T. Les étoiles, précédemment confinées dans le nuage, se dispersent alors dans l'espace.

La deuxième catégorie de groupes stellaires faciles à observer dans la Voie lactée porte le nom de deux types d'étoiles, étiquetées O et B, qui sont parmi les plus lumineuses et les plus massives de l'Univers. Ces amas, les associations OB, contiennent environ dix fois plus d'étoiles que les associations T, quelques-unes des étoiles étant de types O et B. L'amas de la nébuleuse d'Orion est un exemple d'association OB.

Toutes les jeunes associations OB ont des densités élevées d'étoiles et seraient issues de nuages précurseurs massifs. Mais en dépit de la gravité énorme au sein de ces systèmes, les étoiles des associations OB plus âgées se dispersent en filant à grande vitesse dans l'espace. En effet, des images prises à quelques décennies

UN MÉCANISME, TROIS TYPES D'AMAS

Les trois types d'amas stellaires les plus faciles à observer dans la Voie lactée naissent tous d'un nuage diffus de poussière et de gaz, au sein duquel de petites régions se sont condensées pour former des étoiles.

L'auteur propose qu'un facteur unique (la masse du nuage précurseur) explique les différences ultérieures d'évolution et de structure des amas (*ci-dessous*). Tout d'abord,

les nuages se sont contractés, accélérant la production d'étoiles à des rythmes déterminés par la masse initiale. Les nuages de masse plus importante se sont davantage contractés et ont engendré des étoiles à un rythme plus rapide. Puis les amas se sont étendus et les nuages se sont dispersés en partie ou en totalité, selon le nombre et les types d'étoiles présentes.

Nuage initial

Nuage qui se contracte

État observé

Association T

Ces amas ne perdurent que quelques millions d'années et comportent jusqu'à quelques centaines d'étoiles jeunes, de type T Tauri, entourées des vestiges du nuage précurseur. Ils apparaissent quand un nuage de faible masse se contracte lentement sous l'effet de sa propre gravité. La contraction modérée produit un petit nombre d'étoiles. Puis le vent stellaire disperse le nuage. Les étoiles, peu liées entre elles, s'éloignent alors les unes des autres.

Association OB

Ces amas peuvent rester liés pendant dix millions d'années et comportent des milliers d'étoiles très rapprochées, dont quelques étoiles très massives de types O et B. Pour produire un amas aussi dense, le nuage précurseur doit être extrêmement massif et se contracter rapidement. Le rayonnement ultraviolet des étoiles les plus massives détruit le nuage précurseur, et l'amas s'étend avant de se disperser en éjectant les étoiles animées d'une vitesse élevée.

Amas ouvert

Ces amas peuvent persister des centaines de millions d'années, mais ils contiennent beaucoup moins d'étoiles que les associations OB. Ces groupes naissent probablement de la contraction d'un nuage de masse intermédiaire. Les étoiles sont proches, mais peu massives. La gravité lie les étoiles entre elles et maintient la cohésion de l'amas après la dispersion du nuage de gaz par les vents stellaires.

L'enfance tumultueuse des amas globulaires

Les amas globulaires comptent parmi les plus anciens objets de l'Univers. Les plus vieux d'entre eux, âgés de 13,7 milliards d'années, sont contemporains de l'époque de formation de leurs galaxies hôtes. Chacun d'eux héberge plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers d'étoiles que l'on pensait, jusqu'il y a peu, nées en même temps d'un nuage chimiquement homogène. Cependant, des observations récentes avec le VLT (*Very Large Telescope*) de l'Observatoire austral européen (ESO) et le télescope spatial *Hubble* ont révélé la présence, au sein des amas, de multiples générations stellaires présentant des compositions chimiques très variées (avec en particulier des anomalies en sodium et en oxygène).

Cette découverte a remis en question la vision classique de l'évolution chimique et dynamique des amas stellaires massifs. Elle révèle en particu-

lier l'influence qu'a pu avoir sur le nuage parent une première génération d'étoiles massives. Celles-ci, nées dans les régions les plus centrales de l'amas et rapidement disparues, auraient tourné à des vitesses proches de la vitesse de rupture : les étoiles perdent alors une grande quantité des produits de la fusion de l'hydrogène suivant un disque circumstellaire. Riches en sodium et pauvres en oxygène, les éjectas se seraient alors mélangés avec le gaz interstellaire pour donner naissance à des étoiles de faible masse encore vivantes aujourd'hui et présentant des compositions chimiques en accord avec les observations.

Entre la première et la seconde génération d'étoiles, la composition chimique des astres s'enrichit en sodium. Un recensement des étoiles a mis en évidence un déficit d'étoiles de faible masse de première génération,



Amas globulaire NGC 2808

© NASA/ESA, S. J. Piotto

dont la plupart ont dû être éjectées hors de l'amas. La masse initiale des amas globulaires était donc au minimum 10, voire 20 à 30 fois plus élevée qu'aujourd'hui soit, pour les amas les plus massifs, tel NGC 2808 (*voir ci-dessus*), de l'ordre de quelques millions de masses solaires.

Des phénomènes dynamiques se seraient produits quelque 40 millions d'années après la formation des amas. Des trous noirs et des étoiles à neutrons, résidus des étoiles de première génération, auraient expulsé le gaz in-

terstellaire. Cela expliquerait la perte des petites étoiles.

Certaines hypothèses clés de ce nouveau modèle de l'évolution chimique et dynamique des amas stellaires massifs doivent maintenant être validées. Au moyen de simulations numériques hydrodynamiques, il faut en particulier s'attacher à modéliser les interactions des éjectas des étoiles massives avec la matière interstellaire dans des environnements extrêmes. Ainsi, on comprendra mieux la formation stellaire induite, ce dernier point étant l'une des questions les plus épineuses de l'astrophysique moderne. Par ailleurs, des simulations à N corps devraient permettre de tester la stabilité de tels systèmes sur des temps comparables à l'âge de l'Univers.

Corinne Charbonnel

Observatoire et Univ. de Genève
CNRS, IRAP, Toulouse

d'intervalle seulement montrent que les étoiles de tels groupes se sont éloignées les unes des autres.

Les jeunes associations OB regorgent de ces étoiles véloces. L'énorme gravité régnant dans ces amas donne une grande vitesse orbitale aux étoiles, qui s'échappent dès que disparaissent les restes du nuage assurant la cohésion gravitationnelle de l'amas.

En outre, les étoiles de type O et B précipitent la destruction du nuage avec leur rayonnement ultraviolet intense. Leur source d'énergie est la fusion nucléaire (à l'œuvre dans le Soleil), mais elles brûlent beaucoup plus vite. Une étoile O typique est 30 fois plus massive que le Soleil, mais elle épuise son combustible en quelques millions d'années seulement – un millier de fois plus vite que le Soleil. Durant cette brève vie, le rayonnement ultraviolet, émis en grande quantité par l'étoile, ionise le gaz environnant, que le vent stellaire disperse. À mesure que le nuage précurseur se dissipe, la gravité décroît. Quand les petites étoiles massives ont enfin expiré et que le nuage précurseur a disparu, la gravité du système ne peut plus retenir les étoiles rapides, qui se retrouvent propulsées dans l'espace. Ainsi, les associations T et OB se défont, que ce soit par usure progressive ou par agitation violente.

Beaucoup moins fréquent, le troisième type de groupes stellaires est remarquable par sa stabilité. Ces amas, dits ouverts, peuvent contenir jusqu'à 1 000 étoiles ordinaires et persistent des centaines de millions, voire des milliards d'années. Pourtant, le nuage moléculaire et son influence gravitationnelle ont disparu depuis longtemps.

De très vieux amas

L'amas des Pléiades est un amas ouvert âgé de 125 millions d'années. Son nuage précurseur a probablement disparu depuis 120 millions d'années, voire plus. L'amas des Hyades situé non loin des Pléiades sur la voûte céleste a 630 millions d'années. À la périphérie de la Galaxie se trouvent des dizaines d'amas ouverts encore plus vieux. L'amas M67, un système comprenant un millier d'étoiles, est né il y a quatre milliards d'années.

Même les amas ouverts ne sont pas permanents ; très peu sont plus anciens que M67. Les astronomes pensent que les amas ouverts finissent par être déstabilisés par le passage d'un nuage moléculaire à proximité. Ils se déchirent et les étoiles s'éparpillent. Mais ces amas soulèvent une difficulté notable : les chercheurs étaient

parvenus à expliquer comment la dispersion des nuages précurseurs entraîne le délitement des associations T et OB, mais ils ne comprenaient pas pourquoi les étoiles des amas ouverts survivent à la dispersion des nuages et restaient liées pendant plusieurs millions d'années.

En écrivant mon livre sur la formation des étoiles, j'ai été conduit à m'interroger sur la diversité des amas. Pour moi, le mystère des amas ouverts n'était qu'un volet d'un ensemble plus vaste de questions. Pourquoi la Galaxie n'abrite-t-elle qu'un nombre restreint de types d'amas ? Comment le type d'amas qu'un nuage moléculaire produit est-il déterminé ?

Pour répondre à ces questions, je me suis demandé quelles forces agissent sur le nuage de gaz. Les étapes de la vie des trois types d'amas que j'ai choisi d'étudier font ressortir deux processus antagonistes agissant sur le nuage : la contraction, due à la gravité, et l'expansion, sous l'effet des vents stellaires et du rayonnement ionisant. Chaque nuage producteur d'étoiles est soumis à ces phénomènes, à des degrés divers.

Dans le cas des associations T et OB, l'expansion finit par l'emporter. Dans le cas des amas ouverts, expansion et contraction semblent s'équilibrer, au moins pendant l'époque critique de formation des étoiles.