

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.

Le destin d'un nuage, tout comme l'aspect de l'amas stellaire produit, serait ainsi déterminé par l'équilibre des forces qu'il subit. La clef de cet équilibre serait la masse initiale du nuage précurseur. Comme on l'a vu, la masse d'un nuage détermine sa gravité ; à son tour, la gravité du nuage régit sa vitesse de contraction. La masse du nuage conditionne aussi le nombre d'étoiles formées.

Ainsi, un nuage de faible masse se contracterait lentement, entraînant une augmentation progressive de sa densité, ce qui produirait un petit nombre d'étoiles ordinaires. Puis les vents de ces étoiles démantèleraient peu à peu le nuage, ce qui inverserait la contraction et laisserait les étoiles s'échapper. Ce scénario correspond bien à ce que nous observons dans les associations T.

À l'extrême opposé, un nuage de masse importante se contracterait rapidement, ce qui formerait de nombreuses étoiles très proches les unes des autres. À terme, le cœur de ce nuage atteindrait une telle densité que quelques étoiles massives naîtraient. Alors, comme on l'observe dans les associations OB, le rayonnement des étoiles massives disperserait le nuage et les étoiles, jusque-là soumises à une gravité importante, seraient éjectées.

Un équilibre des forces

Finalement, il semble probable que pour certaines masses intermédiaires du nuage, les deux effets se compensent. La contraction du nuage et la perte de matière par les vents stellaires atteindraient un équilibre qui assurerait la formation d'étoiles rapprochées, mais peu massives. Dans ces conditions, l'attraction gravitationnelle entre les étoiles serait modérée, mais suffisante pour maintenir la cohésion de l'amas très longtemps après la disparition des restes du nuage, emportés par le vent stellaire. On obtiendrait ainsi des amas ouverts.

Cette théorie de l'équilibre des forces décrivait comment la masse initiale d'un nuage précurseur détermine les effets combinés de la contraction et de l'expansion dans l'amas résultant, et conditionne son évolution. Elle semblait expliquer l'origine des trois types d'amas et leurs propriétés. Il restait cependant à vérifier les prévisions du modèle. Mais, alors que les astronomes pouvaient observer l'expansion et la dispersion dans les associations OB,

personne n'avait trouvé de signes que les nuages moléculaires commencent par se contracter. Un tel phénomène se produit sans doute dans les toutes premières étapes de formation de l'amas, mais les groupes stellaires les plus jeunes (les amas enfouis) ne se prêtent pas à un examen direct. Il me fallait trouver un autre moyen de démontrer que les amas plus âgés ont subi une contraction il y a longtemps.

Les travaux réalisés à la fin des années 1950 par l'astronome Maarten Schmidt, de l'Institut de technologie de Californie (Caltech), m'ont mis sur la piste. M. Schmidt avait observé que le rythme des naissances des nouvelles étoiles dépend de la densité du gaz environnant. J'ai donc

pensé que si un nuage précurseur s'était contracté dans le passé, sa densité aurait augmenté, et le rythme de formation stellaire se serait accéléré. Ma théorie prévoyait donc que le rythme de formation des étoiles a augmenté à l'aube de chaque amas stellaire.

Afin de tester cette conséquence du modèle, il fallait mesurer les rythmes passés de formation stellaire dans les amas. Je devais donc estimer l'âge des étoiles dans les amas pour savoir quand elles sont nées. La théorie de l'évolution stellaire rendait possible cette étude. Notamment, cette théorie décrit comment les étoiles jeunes qui ne brûlent pas encore leur combustible nucléaire – telles les étoiles de type

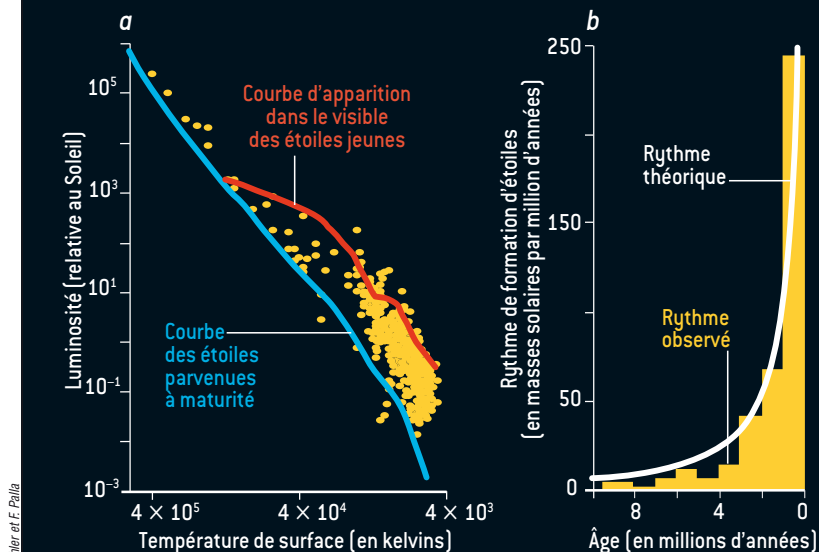
L'ÂGE DES ÉTOILES DANS LES AMAS

Les données de l'amas de la nébuleuse d'Orion, une association OB, confortent la théorie de l'auteur. Au début de l'évolution de l'amas, le nuage s'est contracté. Comme la densité de gaz a augmenté, la formation stellaire s'est accélérée. Cette étape a pris fin il y a une centaine de milliers d'années, mais auparavant le nuage précurseur s'était probablement contracté pendant des millions d'années.

Pour montrer qu'une telle contraction a bien eu lieu, l'auteur a d'abord déterminé l'âge des étoiles jeunes de l'amas (*points jaunes sur la figure a*). Cela peut être déduit de leur température et luminosité. La courbe rouge délimite approximativement la région où les étoiles très jeunes sont détectables dans le spectre visible. En vieillissant, ces étoiles deviennent plus

chaudes et plus pâles. On sait construire la courbe des étoiles parvenues à maturité (*en bleu*). Ainsi, l'évolution stellaire théorique et la position d'une étoile entre les courbes rouge et bleue permettent de déterminer son âge.

L'auteur a ensuite recensé la masse totale des étoiles en fonction de l'âge des étoiles par tranches d'un million d'années. Il a ainsi déterminé le rythme de formation stellaire dans l'amas pour chacune de ces périodes. Les résultats indiquent que la production d'étoiles a augmenté de façon importante au cours du temps, exactement comme le prévoyait le modèle théorique (*b, courbe blanche*) : le nuage s'est contracté, la densité du gaz a augmenté et la formation d'étoiles s'est intensifiée.



S. Stahler et F. Palla