

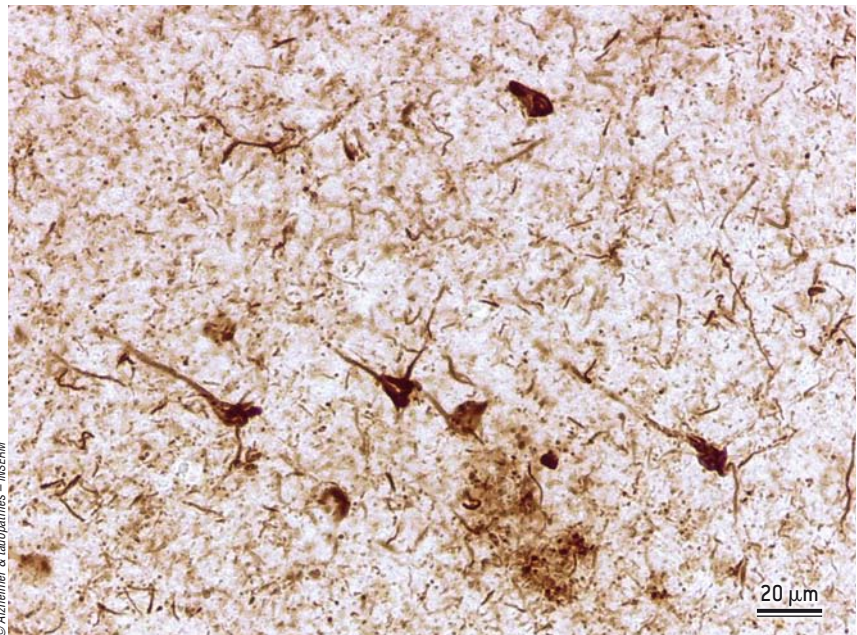
barrière hémato-encéphalique qui entoure le système nerveux central, et leur utilisation dans le traitement des cancers a parfois provoqué des lésions nerveuses périphériques. Depuis 2012, de nouveaux composés proches du taxol sont étudiés pour pallier ces difficultés. L'épothilone D notamment, en cours d'essai clinique, traverse la barrière hémato-encéphalique, augmente la densité des microtubules et améliore les capacités cognitives chez l'homme.

Une autre molécule envisagée est le peptide synthétique NAPVSIPQ, qui se lie à la tubuline. Utilisée dans plusieurs modèles animaux, elle stabilise les microtubules et améliore les performances cognitives. En 2009, un essai clinique de phase II a montré l'efficacité de ce peptide, administré par le nez à des patients à un stade modéré de la maladie d'Alzheimer.

Une autre approche consiste à augmenter la dégradation des protéines tau mal repliées. Pour ce faire, on module l'activité d'une protéine impliquée dans la dégradation des protéines tau anormales : la protéine Hsp90. Un des rôles de cette protéine « chaperonne » est de détecter les protéines anormales et de les adresser aux lysosomes, des compartiments où elles seront dégradées. Ce mécanisme, dit d'autophagie médiée par les chaperonnes, contrôle notamment le repliement de tau et prépare les protéines anormales pour leur dégradation. Toutefois, il semble ne fonctionner que tant que celles-ci ne sont pas trop nombreuses. En effet, plusieurs équipes ont montré que, dans des modèles *in vitro* et *in vivo* de tauopathies, des inhibiteurs de Hsp90 diminuent la quantité de protéine tau phosphorylée. En d'autres termes, non seulement la protéine Hsp90 ne remplissait pas son rôle dans ces modèles, mais elle empêchait l'autophagie de tau d'avoir lieu.

On peut aussi directement augmenter la dégradation de la protéine tau par les lysosomes : récemment, on a montré que le tréhalose, qui favorise l'autophagie médiée par les chaperonnes, diminue l'accumulation de la protéine tau mal repliée.

On envisage même d'intervenir sur la machinerie de production des isoformes de tau afin de rééquilibrer leurs proportions. De fait, plusieurs études suggèrent qu'un défaut d'épissage et en particulier une augmentation des formes à quatre domaines de liaison aux microtubules contribueraient



5. SUR CETTE COUPE DE CERVEAU HUMAIN observée au microscope, les neurones en dégénérescence neurofibrillaire sont marqués à l'aide d'un anticorps dirigé contre la protéine tau phosphorylée (en marron).

Plusieurs tentatives d'immunothérapie passive ont permis de réduire l'agrégation de tau et d'améliorer le comportement des animaux traités.

de traduction du gène, a également permis de modifier le ratio des isoformes à quatre et trois domaines de liaison.

L'immunothérapie, enfin, fait l'objet de plus en plus d'attentions. Le premier essai de vaccination contre la protéine tau, en 2006, a été décevant : l'injection chez des souris de la protéine tau a engendré des lésions neuronales accompagnées de déficits cognitifs et d'une inflammation cérébrale. Cet essai montrait que l'immunothérapie dite active, par vaccination contre la protéine tau, peut engendrer une réponse auto-immune. Toutefois, depuis, plusieurs études d'immunothérapie active dirigée contre la protéine tau phosphorylée ou tronquée ont permis de réduire l'agrégation

de la protéine tau et d'améliorer les performances motrices et cognitives des animaux traités.

Toutefois, l'immunothérapie dite passive est une approche plus sûre : au lieu d'injecter une partie de la protéine anormale pour déclencher la production, par l'organisme, d'anticorps de cette protéine, on injecte directement des anticorps de la protéine anormale, lesquels provoqueront son élimination. Récemment, plusieurs tentatives d'immunothérapie passive ont permis de réduire l'agrégation de tau et d'améliorer le comportement des animaux traités. Néanmoins, les mécanismes sous-jacents de l'immunothérapie antitau, active ou passive, sont encore à élucider.

Nous n'en sommes qu'au début de la compréhension des maladies à prions, mais une chose est sûre : la protéine tau fait partie des clés incontournables dans l'étude de ces pathologies. L'ensemble de ses altérations structurales et fonctionnelles explique en grande partie les différentes pathologies démentielles avec dégénérescence neurofibrillaire. Les signatures moléculaires des protéines tau anormales sont devenues une aide au diagnostic neuropathologique, et permettront peut-être bientôt un diagnostic biologique. Et de nouvelles approches thérapeutiques naîtront sans nul doute de la compréhension de leur fonctionnement. ■

La vie intérieure des *amas* *stel*

L'ESSENTIEL

- Les étoiles se forment en amas, au sein de nuages de gaz et de poussière.
- On observe plusieurs types d'amas dans la Voie lactée. Ils sont caractérisés par des structures et des évolutions différentes.
- La masse du nuage de poussière à l'origine de l'amas en détermine le type. Elle joue sur l'équilibre entre contraction et expansion dans l'amas.
- Les amas dits ouverts gardent une cohésion pendant plusieurs centaines de millions d'années après la disparition du nuage qui les a engendrés.

NASA, ESA, AURA et Caltech

LES PLÉIADES constituent un amas « ouvert ». Les étoiles les plus brillantes de l'image forment un des groupes les plus stables de la Voie lactée.

laires

Steven Stahler

Les étoiles naissent en groupes, avant de se disperser dans l'espace. Une théorie explique comment ces amas stellaires se font et se défont ou, parfois, perdurent pendant des centaines de millions d'années.

Le ciel nocturne est parsemé d'étoiles, que nous regroupons de façon arbitraire en constellations. Ces motifs séduisants ne sont pour la plupart que des projections de l'esprit de l'homme. La majorité des étoiles, dans la Voie lactée comme dans les autres galaxies, n'ont pas de véritable lien physique les unes avec les autres.

Pourtant, toutes les étoiles ont commencé leur vie au sein d'un groupe d'astres, nés à la même époque; elles se sont ensuite éloignées les unes des autres. Les astronomes observent aujourd'hui ces amas stellaires à différents stades de leur évolution. L'amas des Pléiades (*ci-contre*) et l'amas de la nébuleuse d'Orion (*voir page 52*) en sont deux exemples.

Les amas d'étoiles existent sous différentes formes, allant de la fragile association de quelques dizaines de membres à l'agrégat dense de millions d'étoiles. Certains groupes sont très jeunes (quelques millions d'années seulement), d'autres datent de l'aube de l'Univers. Au sein de ces ensembles, on trouve des étoiles à tous les stades de leur cycle de vie. C'est l'observation des étoiles dans les amas qui a permis aux astrophysiciens de confirmer la théorie actuelle de l'évolution des étoiles.

Et pourtant, on sait mal comment évoluent les amas. Pourquoi existe-t-il différents types d'amas? Pourquoi certains ne durent-ils que quelques millions d'années et d'autres beaucoup plus longtemps? Nous comprenons bien mieux les étoiles que les berceaux où elles sont nées! L'ironie de cette situation m'a frappé il y a une vingtaine d'années, quand j'ai commencé à rédiger un manuel universitaire sur la formation des étoiles avec Francesco Palla, de l'Observatoire d'Arcetri près de Florence, en Italie. Alors que nous décrivions les différents aspects et les avancées de ce riche domaine de recherche, nous avions toujours à l'esprit une question importante: comment se forment les amas d'étoiles?

à Berkeley (États-Unis).

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



NASA/JPL-Caltech/STScI

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

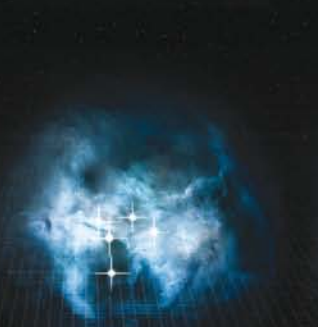


État observé



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.

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

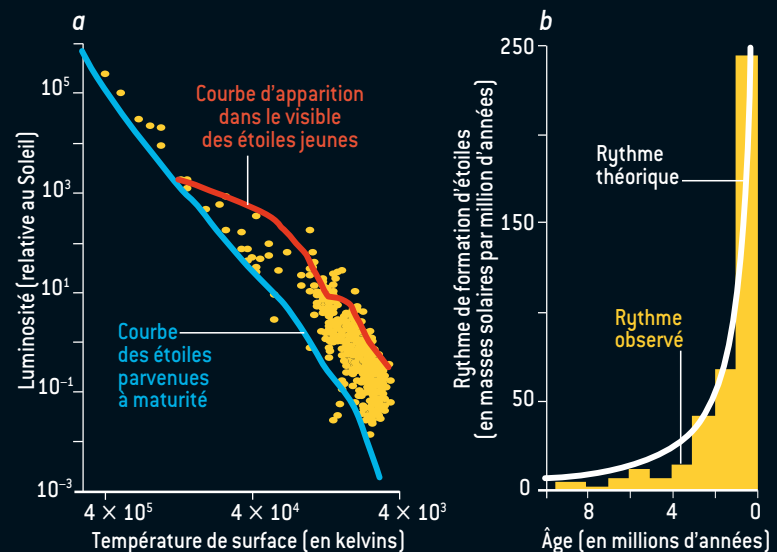
L'ÂGE DES ÉTOILES DANS LES AMAS

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.



UN PAS DE TROIS STELLAIRE

Dans les simulations numériques, les amas ouverts continuent à s'étendre lentement pendant des centaines de millions d'années. L'auteur suggère que cette expansion aurait pour moteur les systèmes binaires, des paires d'étoiles en orbite l'une autour de l'autre, fréquentes dans les amas stellaires (ci-dessous). Lorsqu'une étoile s'approche du système binaire, un ballet gravitationnel compliqué s'engage. Puis la plus légère des trois étoiles est éjectée à grande vitesse du système. L'étoile expulsée rencontre d'autres étoiles de l'amas, transférant au passage son énergie. Cet échange accélère les autres étoiles, ce qui élargit leurs orbites et repousse les frontières de l'amas plus loin dans l'espace.

Étoile éjectée, communiquant son énergie à d'autres étoiles

Système binaire

Étoile à l'approche

Orbites perturbées

Nouveau système binaire

Malcolm Godwin

T Tauri – se comportent au fil du temps. Celles-ci sont de masse comparable à celle du Soleil et aussi lumineuses que ce dernier. Mais au lieu de briller grâce à la fusion nucléaire, elles rayonnent la chaleur produite par leur contraction gravitationnelle. Au fil du temps, le rythme de leur contraction ralentit, tandis que leur température de surface continue d'augmenter. En vieillissant, les étoiles deviennent ainsi plus pâles et plus chaudes, selon un schéma connu (voir l'encadré page 55).

En mesurant la température de surface et la luminosité d'une étoile T Tauri, il est possible de déterminer depuis combien de temps l'étoile se contracte : en pratique, on obtient son âge. L'ensemble des âges de toutes les étoiles au sein d'un amas donné révélerait l'historique de formation stellaire du groupe, c'est-à-dire quand et à quel rythme les étoiles membres se sont formées.

J'ai appliqué cette méthode aux amas les plus proches, sur lesquels nous disposions de données. Avec F. Palla, nous avons trouvé que, pour tous les groupes d'étoiles ayant encore des nuages de gaz bien fournis, le rythme de formation stellaire augmente au fil du temps. En 2000, nous avons montré que le rythme des naissances stellaires dans

l'amas de la nébuleuse d'Orion a augmenté pendant des millions d'années avant que le nuage précurseur ne se disperse. Mon hypothèse était correcte : au début de leur histoire, tous les nuages formant des amas se contractent.

Simuler la dynamique des amas

Certains éléments de la théorie se confirmaient, mais l'ensemble donnait-il bien des amas tels que nous les observons ? En 2007, avec Eric Huff, maintenant à l'Université de l'Ohio, nous avons construit un modèle théorique du nuage précurseur de l'amas de la nébuleuse d'Orion. Notre modèle incluait les forces de contraction et d'expansion postulées par ma théorie. Dans les simulations numériques fondées sur ce modèle, le nuage se contractait comme je l'avais prévu. Nous avons alors appliqué une recette empirique, connue sous le nom de loi de Schmidt-Kennicutt, qui relie l'augmentation de densité dans une petite région du nuage et le rythme local de formation stellaire.

Notre modélisation a mis en évidence une accélération de ce rythme, qui correspondait à ce que F. Palla et moi avions observé dans l'amas de la nébuleuse d'Orion. Ce

résultat supplémentaire confortait encore davantage l'hypothèse de la théorie d'équilibre des forces, selon laquelle les nuages précurseurs se contractent aux stades premiers de l'évolution des amas.

Malheureusement, les méthodes que nous avons utilisées pour mesurer le rythme de formation précoce dans les amas tels que le groupe de la nébuleuse d'Orion ne s'appliquent pas aux amas ouverts. La plupart de ces amas sont trop vieux ; leur durée de contraction et de formation stellaire (quelques millions d'années) ne représente qu'une minuscule fraction de la vie de ces amas. Les outils permettant de discerner l'âge des étoiles n'ont pas la précision nécessaire pour déterminer si le nuage précurseur s'est contracté. En outre, nous ne savons pas encore simuler les nuages précurseurs de ces amas ouverts. Les nuages se sont dispersés il y a si longtemps que nous ne pouvons même pas deviner leur masse ou leur comportement. Pour l'instant, les premières étapes de l'évolution des amas ouverts restent inaccessibles, même aux observations indirectes.

Il est cependant possible de modéliser l'évolution d'un amas ouvert, dont le nuage précurseur a déjà disparu, grâce à des simulations dites « à N corps ». Dans ces simulations, l'ordinateur résout les

équations couplées qui décrivent le mouvement de nombreux objets soumis à leur attraction gravitationnelle mutuelle. Cette approche a élucidé ce qui se passe dans les amas ouverts après la contraction initiale génératrice d'étoiles et nous a apporté un éclairage inattendu sur les forces régissant l'expansion des amas.

Bien que les amas ouverts soient stables, ils ne sont pas statiques. L'attraction mutuelle de leurs étoiles crée un brassage lent et constant, les étoiles parcourant des orbites qui s'entrecroisent. Des simulations à N corps décrivent ce ballet induit par la gravité. Il y a plusieurs années, avec Joseph Converse, maintenant à l'Université de Tolède, nous avons emprunté cette voie numérique pour élucider l'histoire de l'amas ouvert des Pléiades. Il s'agissait de deviner une configuration initiale de l'amas, puis de la laisser évoluer pendant 125 millions d'années. Nous avons comparé l'amas simulé obtenu avec son homologue réel, et nous avons ajusté les conditions initiales jusqu'à ce que la simulation à N corps produise un amas qui ressemble à la réalité.

Nous avons été surpris. Il semble que tout en restant lié par la gravitation, l'amas des Pléiades n'a cessé de se dilater régulièrement depuis que son nuage s'est dispersé. Les étoiles s'éloignent lentement les unes des autres. Ce résultat est en contradiction avec les analyses antérieures, qui suggéraient que les étoiles des amas ouverts se répartiraient peu à peu en un cœur d'étoiles massives et une enveloppe externe d'étoiles plus légères. Ce schéma de ségrégation, nommé relaxation dynamique, décrit habituellement l'évolution temporelle des amas liés par la gravitation. C'est ainsi, par exemple, que se comportent les amas globulaires. Mais même quand nous laissons tourner notre simulation 900 millions d'années dans le futur, l'expansion se poursuit de façon uniforme.

Ce résultat indique que l'analyse classique aurait omis un facteur critique dans l'équilibre des forces qui déterminent l'évolution des amas. À quoi est due cette expansion uniforme des amas ouverts ? Les étoiles binaires semblent être la clef du processus. Ces paires de compagnons proches en orbite l'un autour de l'autre sont très fréquentes dans les groupes d'étoiles. Au milieu des années 1970, Douglas Heggie, maintenant à l'Université d'Édimbourg, en Écosse, a étudié l'impact d'une troisième

étoile s'approchant d'un système binaire. Les simulations numériques montrent que les trois astres entament un ballet compliqué au terme duquel le plus léger des trois est éjecté à grande vitesse. L'étoile qui s'échappe rencontre bientôt d'autres membres de l'amas et leur communique une partie de son énergie, ce qui augmente la vitesse orbitale des étoiles. Dans nos simulations à N corps, c'est l'énergie de ces rencontres successives qui entraîne l'expansion de l'amas ouvert, un phénomène cependant si lent qu'il passe inaperçu aux yeux des astronomes.

Des mystères qui persistent

Ainsi, les différents travaux semblent confirmer l'hypothèse que la masse initiale du nuage moléculaire détermine la structure de l'amas et son évolution. Mais certains aspects de la théorie restent à vérifier. Par exemple, une observation montrant l'expansion uniforme des amas ouverts serait cruciale.

Les résultats mettent aussi en lumière les nombreuses lacunes dans nos connaissances sur les amas d'étoiles. Nous n'avons pas encore les outils pour modéliser la façon dont certaines régions des nuages précurseurs deviennent assez denses pour former des étoiles. Et plusieurs décennies d'observations dans les domaines radio et infrarouge n'ont pas permis de révéler les mouvements au sein de ces nuages. La phase de naissance des groupes stellaires (qui se déroule au sein de l'épaisse poussière des amas enfouis) reste enveloppée de mystère. En outre, il faut encore évaluer le rôle exact des vents stellaires.

Néanmoins, le modèle d'équilibre des forces que mes collègues et moi avons développé peut aider à obtenir davantage d'informations sur la phase primordiale des amas et la dynamique du nuage de gaz.

L'impact de ces recherches pourrait s'étendre bien au-delà des amas eux-mêmes. Certains astronomes pensent par exemple que le Soleil s'est formé au sein d'une association OB très peuplée et que la présence proche d'étoiles voisines a perturbé le disque environnant de gaz et de poussière, ce qui a façonné le Système solaire. Les nuages moléculaires qui engendrent des amas pourraient même influencer sur l'évolution globale du milieu interstellaire et des galaxies. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

S. W. Stahler, **The birth and death of star clusters in the Milky Way**, *Physics Today*, vol. 65, n° 10, pp. 46-52, 2012.

J. M. Converse et S. W. Stahler, **The dynamical evolution of the Pleiades**, *MNRAS*, vol. 405, pp. 666-680, 2010.

S. W. Stahler et F. Palla, **The Formation of Stars**, Wiley-VCH, 2004.

C. R. O'Dell, **The Orion Nebula : Where Stars Are Born**, Belknap Press/Harvard University Press, 2003.

C. J. Lada et E. A. Lada, **Embedded clusters in molecular clouds**, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 41, pp. 57-115, 2003.

Les **g**rands albatros vautours des mers

D. Grémillet, A. Prudor, Y. Le Maho et H. Weimerskirch

Le plus grand oiseau de la planète passait
pour un pêcheur. C'est en réalité un charognard
des mers, ont découvert les biologistes.

