

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.