

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

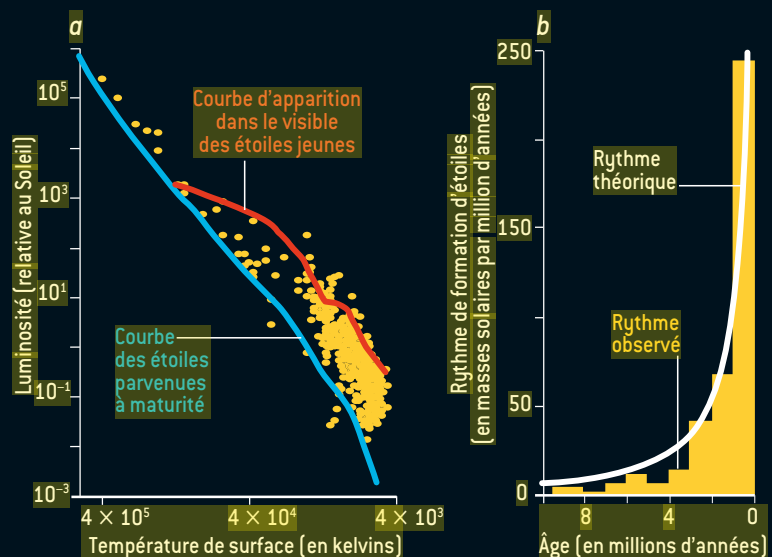
L'ÂGE DES ÉTOILES DANS LES AMAS

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

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