

Les amas globulaires (II)

Yaël Nazé¹

Dans la première partie de cet article, nous avons commencé à évoquer ces objets extraordinaires que sont les amas globulaires. Nous avons énuméré leurs caractéristiques principales, écouté leur histoire et découvert les contributions majeures qu'ils ont apportées à l'Astronomie moderne. Mais il nous reste encore beaucoup à comprendre, notamment l'évolution et le mécanisme de formation de ces amas ; dans la dernière section de cet article, nous découvrirons aussi les amas globulaires des autres galaxies.

L'évolution des amas globulaires

On estime que plus de la moitié des amas globulaires qui existent aujourd'hui seront détruits dans les 15 prochains milliards d'années. Par le passé, il devait d'ailleurs y avoir au moins 10 fois plus d'amas qu'aujourd'hui ! Ces objets connaissent donc une évolution importante, et un des défis de l'Astronomie moderne est de la modéliser correctement. Certains astronomes sont déjà parvenus à simuler la dynamique de groupes de quelques milliers d'étoiles, mais il faudra attendre encore un peu l'évolution informatique pour pouvoir modéliser des amas réels comptant jusqu'à un million d'étoiles.

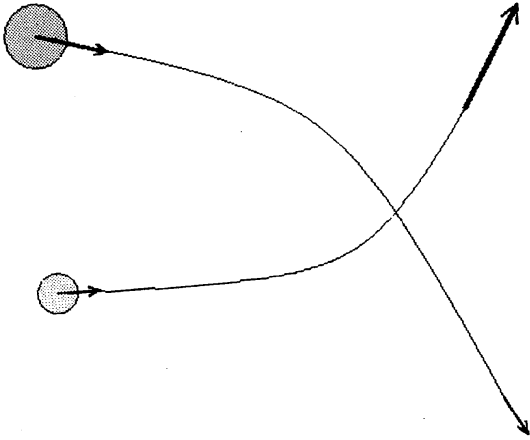
Cette évolution n'est pas sans conséquences : les propriétés originales de notre système d'amas globulaires, dont il ne reste donc que 10 %, nous sont à jamais cachées — même si l'on peut tenter d'en estimer certaines —, et cela ne facilite évidemment pas la tâche des astronomes qui s'interrogent sur leur formation !

Il y a quatre grands types de processus évolutifs :

- *la relaxation violente* : lorsque l'amas est jeune, il est dans le stade le plus précaire de son existence. En effet, les vents stellaires importants et les explosions en supernovæ des étoiles massives sont capables de chasser hors de l'amas le gaz résiduel qui n'a pas été utilisé lors de la formation des étoiles, ce qui peut conduire à la dispersion des étoiles et donc à la destruction de l'amas. Ce processus doit son nom au fait qu'il est assez rapide, et qu'il est dû à des événements « violents ».
- *les chocs avec le disque ou le bulbe galactiques* : lorsque l'amas, qui gravite autour du centre galactique, passe à travers le plan ou le bulbe de notre Galaxie, il perd certaines de ses étoiles périphériques. Lors d'une rencontre avec le disque et suite au choc gravitationnel qui en résulte, il se produit un transfert d'énergie vers les étoiles de l'amas, dont la vitesse augmente, ce qui leur permet de s'échapper. Dans le cas de chocs avec le bulbe, les effets de marée, dont l'intensité est d'autant plus grande que l'amas s'approche du centre galactique, sont capables de lui arracher des étoiles.
- *la friction dynamique* : comme nous l'avons évoqué dans la première partie de cet article, les amas globulaires ne sont pas les seuls objets du halo de notre Galaxie. De nombreuses étoiles du champ y sont présentes, et les amas interagissent avec elles. Ces étoiles isolées peuvent, lorsqu'elles interagissent avec un amas globulaire, augmenter leur vitesse en puisant de l'énergie orbitale de l'amas, ce qui contraint celui-ci à se rapprocher progressivement du centre galactique. Un amas qui tombe ainsi en spirale vers le centre subit de plus en plus fréquemment de chocs avec le bulbe et le disque, et il sera finalement disloqué

¹ L'auteur tient à remercier Melle Geneviève Parmentier pour sa relecture attentive et ses judicieuses recommandations de lecture.

par les forces de marée exercées par notre Galaxie bien avant d'en atteindre le centre lui-même.



La relaxation interne : lors d'une rencontre entre deux étoiles, l'énergie de l'étoile qui a la masse la plus faible tend à augmenter.

- *la relaxation interne* : c'est le processus le plus important. Au coeur des amas, la densité stellaire est élevée, et la probabilité que deux étoiles s'approchent l'une de l'autre est loin d'être négligeable. Lors de ces rencontres, l'énergie cinétique du couple (égale à $1/2m_1v_1^2 + 1/2m_2v_2^2$) a tendance à se distribuer entre les deux étoiles : les étoiles de faible masse acquièrent donc une vitesse importante, et elles s'éloignent vers les régions extérieures de l'amas, tandis que les étoiles massives et les résidus stellaires (trous noirs, étoiles à neutrons, naines blanches) migrent vers le centre. Ce processus porte le nom de ségrégation en masse. Parfois, l'étoile de faible masse peut même acquérir lors de la rencontre une vitesse si grande qu'elle peut s'échapper de l'amas : on dit que l'amas « s'évapore ». De plus, lors des chocs avec le plan ou le bulbe galactiques, ce sont surtout les étoiles périphériques qui sont affectées : il y a donc bien une perte sélective d'étoiles. Il faut noter que la présence

d'un champ gravifique extérieur (comme celui de notre Galaxie) rend ce processus de relaxation bien plus efficace.

Les amas globulaires ne disparaissent évidemment pas en quelques années ! Pour un amas comptant des centaines de milliers d'étoiles, il faut attendre - selon sa densité et sa position — entre 30 millions et 20 milliards d'années pour que les effets cumulés de toutes ces rencontres individuelles deviennent importants. Mais cette relaxation n'est pas sans risque, et elle peut avoir pour effet de provoquer un effondrement du coeur. Cette éventualité concernerait 20 % des amas globulaires — surtout ceux qui sont proches du centre galactique. Tout comme le coeur d'une étoile massive s'effondre juste avant son explosion en supernova, le coeur des amas globulaires peut s'effondrer rapidement sur lui-même : on assiste à un effet « boule de neige » dû aux effets cumulés de la relaxation interne. Pour un objet visible, il peut y avoir à ce moment jusqu'à 100 objets « invisibles » (étoiles à neutrons, trous noirs, naines blanches) dans le coeur !

Pour mieux comprendre ce processus d'effondrement, une analogie thermodynamique, due à Lynden-Bell, est utile. Considérons donc une masse sphérique de gaz auto-gravitante, et supposons que la température au centre, T_c , soit plus élevée que la température T_p à la périphérie. Un flux de chaleur du coeur vers la périphérie va évidemment tendre à équilibrer ces deux températures. Mais si la température du coeur diminue, celui-ci va se contracter sous l'action de la gravitation ; l'énergie gravitationnelle libérée se transforme en chaleur, et il se peut que la température finale soit supérieure à la température initiale. Si c'est le cas, le mécanisme s'emballe : le coeur s'effondre sur lui-même !

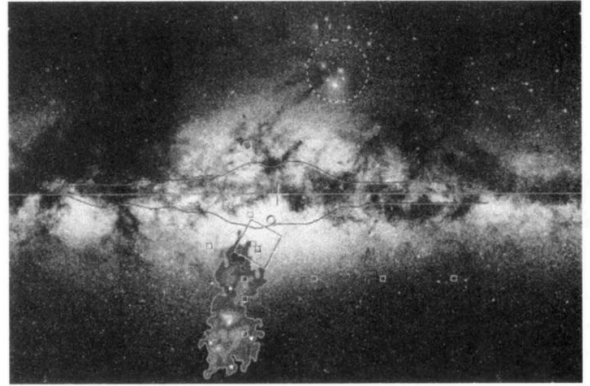
Ce processus d'effondrement peut-il s'arrêter ? La réponse est oui, grâce... aux étoiles doubles ! Comme nous allons le voir, ces couples stellaires sont en effet capables d'apporter de l'énergie au coeur de l'amas, ce qui va stopper sa contraction plus avant : l'inéluctable effondrement s'arrête. On a longtemps pensé que la fraction d'étoiles binaires dans les amas globulaires était faible — voire nulle ; on sait aujourd'hui qu'il n'en est rien, mais ces couples sont tout simplement

difficiles à trouver. Les premières observations en rayons X ont permis de mettre en évidence de nombreuses sources X associées à des étoiles doubles : ce sont les fameuses binaires X, composées d'une étoile adulte et d'un compagnon compact, et les novæ. On a fini aussi par trouver quelques binaires à éclipses en suivant en détail l'évolution de la luminosité des milliers d'étoiles des amas, et on a découvert des pulsars rapides dont, même s'ils sont seuls aujourd'hui, l'importante vitesse de rotation ne peut s'expliquer que s'ils ont fait partie jadis d'un système binaire.

Les étoiles binaires qu'on observe aujourd'hui n'ont pas nécessairement été créées en même temps que l'amas qui les héberge : en fait, même s'il n'en existait aucun au départ, des couples ont dû se former lors des rencontres entre les étoiles de l'amas... et ces rencontres sont évidemment plus probables au coeur des amas qui s'effondrent. Les simulations montrent que si deux étoiles passent à moins de trois rayons stellaires l'une de l'autre, un étoile double se forme ; ce processus libère de l'énergie, qui est transférée aux autres composantes de l'amas, ce qui permet d'arrêter son effondrement. De même, lors de la rencontre simultanée entre trois étoiles, on peut voir se former une binaire lâche — si lâche qu'une sur mille seulement survivra — et une étoile de vitesse élevée, capable de s'échapper du coeur de l'amas. Enfin, une étoile peut aussi passer au voisinage d'une binaire déjà formée : dans ce cas, la binaire cèdera un peu d'énergie à l'étoile isolée, ce qui augmentera sa vitesse et lui permettra de s'échapper du coeur, tandis que la binaire deviendra un peu plus serrée. Toutes ces rencontres, qui ont pour effet d'augmenter la vitesse d'étoiles isolées, contribuent à l'arrêt de l'effondrement.

Même si l'on pense avoir observé des amas dont le coeur s'est effondré, on peut se demander si les processus dynamiques que nous venons d'évoquer ont réellement lieu. Après tout, la forme bizarre de ces amas pourrait être due à une toute autre cause, encore inconnue. Observe-t-on des amas qui s'évaporent ? La réponse est positive : on observe parfois, à proximité de certains amas, des « queues » d'étoiles qui ressemblent à la queue des comètes : les étoiles de cette queue ne font

déjà plus partie de l'amas, mais elles n'ont pas encore eu le temps de beaucoup s'en éloigner. Il existe même une galaxie — la fameuse galaxie naine du Sagittaire, qui est en train de se faire dévorer par la nôtre — qui subit un processus semblable : ici aussi, c'est un mécanisme d'évaporation qui disperse irrémédiablement de nombreuses étoiles du halo et du corps de cette galaxie...



La galaxie naine du Sagittaire

Ce type de processus permet d'ailleurs d'expliquer la présence des étoiles du champ. En plus des étoiles provenant de proto-amas avortés, qui n'ont pas résisté aux explosions des supernovæ (cf. ci-dessus), une partie des étoiles du champ proviendraient donc de l'évaporation au cours du temps des amas globulaires et des galaxies avalées par la nôtre. Puisque certains pensent qu'il n'existe plus qu'un dixième de la population initiale des amas globulaires, et que la Voie Lactée a certainement absorbé dans le passé plus d'une galaxie satellite, c'est par millions que des étoiles ont ainsi dû être dispersées, même si ce sont préférentiellement les amas de faible masse qui ont été détruits !

Terminons cette évocation de la dynamique interne des amas globulaires par l'évocation de la découverte récente d'objets très denses au coeur de deux amas globulaires, M15 et G1 (ce dernier appartient à la galaxie d'Andromède). On a tout d'abord cru qu'il s'agissait de trous noirs de masse intermédiaire entre celle des trous noirs stellaires, résidus de l'explosion d'une étoile très massive, et celle des trous

noirs supermassifs qui sont nichés au coeur des galaxies. Ces « petits » trous noirs auraient grandi peu à peu, avalant tout ce qui passait à leur portée. Quelques mois plus tard, la masse de ces trous noirs a cependant dû être revue à la baisse. Un autre modèle, plus simple, semble expliquer tout aussi bien les observations : le coeur de M15 pourrait en fait contenir un grand nombre de résidus stellaires dans un espace réduit. Si la nature du coeur des amas effondrés n'est pas encore connue de façon définitive, rappelons que plus le temps passe et plus la relaxation interne fait son oeuvre : le nombre d'objets dans le coeur ne fait donc que croître avec le temps : les deux explications proposées ci-dessus semblent en tout cas en accord avec ce modèle général.

La naissance des amas globulaires

On peut se demander comment ces agglomérats de plusieurs milliers à quelques millions d'étoiles se sont formés. Encore aujourd'hui, la réponse à cette question n'est pas claire, et des débats intenses font toujours rage entre spécialistes. Tentons néanmoins de voir où l'on en est actuellement, en confrontant les différents modèles à l'observation.

On distingue généralement trois types de scénarios de formation, que l'on peut classer en scénarios primaires, secondaires ou tertiaires, suivant que les amas globulaires se sont formés avant, en même temps ou après leur galaxie-hôte. Dans ce contexte, notons que le mot « après » doit être compris comme « quand la galaxie a atteint un état plus ou moins stable ».

a. Les scénarios primaires

Comme les amas globulaires de notre Galaxie sont très âgés, certains scientifiques ont émis l'hypothèse qu'il régnait au début de l'Univers des conditions particulières qui auraient favorisé l'éclosion des amas globulaires. D'après ces astronomes, les premiers systèmes à se former dans l'Univers primitif devaient avoir une masse de l'ordre d'un million de masses solaires, c'est-à-dire une valeur proche de celle des amas. On peut même introduire une variante dans ce scénario : les amas se seraient préférentiellement formés

dans des régions de densité élevée, celles où naîtraient les futurs amas de galaxies, ce qui expliquerait qu'on en observe davantage aujourd'hui dans ces régions privilégiées.

Mais ces scénarios primaires ont dû faire face à de nombreuses objections :

- les propriétés des amas observés dépendent de celles de leur galaxie-hôte, ce qui est difficile à imaginer — sauf dans la variante — dans le cas d'une formation antérieure ;
- dans ce scénario, un halo de matière sombre devrait entourer les amas, tout comme c'est le cas pour les galaxies, mais ce halo n'a pas été détecté ;
- on observe depuis peu des amas jeunes (voir plus loin) : les conditions privilégiant la formation des amas n'ont donc pas seulement existé qu'au début de l'Univers ;
- enfin, ces scénarios sont incapables d'expliquer la présence d'amas du disque de notre Galaxie. Il a donc fallu trouver autre chose !

b. Scénarios secondaires

Deux thèses principales s'affrontent ici :

- un énorme nuage de gaz s'effondre rapidement, de façon monolithique (Eggen, Lynden-Bell et Sandage), et il finit par se fragmenter pour donner naissance aux amas ;
- ou bien la galaxie se forme progressivement, par agrégation de morceaux plus petits (Searle et Zinn), chaque morceau étant lui-même composé de fragments plus petits encore ; un type particulier de fragments donnerait naissance aux amas.

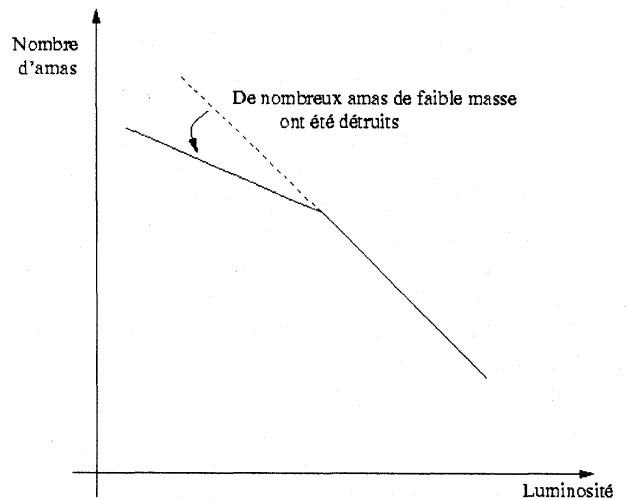
Considérons tout d'abord les théories du premier groupe. En 1985, Fall et Rees ont développé un modèle de formation rapide des amas. Lors de l'effondrement du nuage qui va donner naissance à la galaxie, ils imaginent l'apparition d'une instabilité thermique, qui rend le milieu « grumeleux » : des nuages « froids » (10.000°C) et denses baignent dans un gaz chaud (un million de degrés) et ténu. Ces nuages froids auraient une masse moyenne d'environ un million de masses solaires, ce qui

correspond à la masse « caractéristique »² des amas. Si ce scénario peut être compatible avec les observations dans certains cas, et même s'il a l'avantage de faire appel à un processus de formation rapide (la dispersion de l'âge des amas globulaires observés est en effet faible), il ne peut tout expliquer :

- pour que les étoiles se forment dans ces nuages, le nuage ne peut pas se refroidir trop vite : l'échelle de temps du refroidissement ne peut pas être plus courte que l'échelle de temps dynamique et il faut donc qu'un flux quelconque de rayonnement ultraviolet, provenant par exemple d'étoiles massives, soit présent pour maintenir une température acceptable ;
- les galaxies naines ne peuvent être accompagnées d'amas globulaires, car elles n'auraient pas résisté à une instabilité thermique telle que celle envisagée par le modèle ;
- il existe dans ces modèles une masse minimale pour les amas mais cependant on observe des amas de masse inférieure à cette masse minimale ;
- enfin, la masse minimale des amas doit varier comme la racine carrée de la distance au centre de la galaxie, ce qui est contraire à l'observation. Néanmoins, ce modèle a servi de base à de nombreuses autres théories. Par exemple, Murray et Lin, en 1992, en reprennent l'idée de base, mais ils permettent aux nuages froids de se refroidir un peu plus, jusqu'à environ 1 000°C ; ils suggèrent aussi que c'est la collision entre ces nuages qui déclenche la formation des étoiles. Cependant, ces ingrédients ne règlent aucun des problèmes du modèle de Fall et Rees.

Les théories du second groupe, qui font appel à un assemblage hiérarchique de morceaux épars, compte lui aussi de nombreux partisans. Certains astronomes pensent que les amas globulaires ne correspondent en fait qu'à un cas extrême de la formation stellaire. Or, on sait que l'efficacité de la conversion de gaz en étoiles est assez faible : beaucoup de gaz interstellaire reste inutilisé. Pour constituer un

amas globulaire, il faudrait donc des masses de gaz initiales de 10 à 100 fois plus importantes que celles des amas finals... un problème pour le modèle de Fall et Rees. Puisque les étoiles naissent au sein de nuages moléculaires, alors les étoiles des amas globulaires devraient provenir de la condensation de nuages moléculaires supergéants — eux aussi des cas extrêmes dans la population des nuages moléculaires.



Fonction de luminosité en axes log-log.

Bien qu'ils n'aient aucune preuve tangible de l'existence de tels nuages moléculaires supergéants, Harris et Pudritz, en 1996, observent que la répartition en masse des nuages moléculaires connus ressemble à s'y méprendre à celle des amas globulaires, si on tient toutefois compte du fait que de nombreux amas de faible masse — plus fragiles — ont disparu aujourd'hui. Pour ces astronomes, il n'existerait d'ailleurs pas de « masse caractéristique » pour les amas globulaires³.

² Le fait que la fonction de luminosité des amas (qui donne le nombre d'amas par unité de magnitude, voir la première partie de cet article) présente un pic situé toujours à la même magnitude quelle que soit la galaxie observée laisse penser qu'il existe une luminosité — c'est-à-dire une masse — caractéristique des amas globulaires

³ Si au lieu de porter le nombre d'amas en fonction de leur magnitude — qui est une fonction logarithmique de leur luminosité (ce qui conduit à une courbe gaussienne, cf. *Le Ciel*, mars 2003), on le porte directement en fonction de leur luminosité, la courbe obtenue fait apparaître de simples lois de puissance

Les nuages moléculaires supergéants serviraient de « blocs de base » pour la construction des amas globulaires et des galaxies, et ils proviendraient eux-mêmes de la fusion de nuages plus petits.

Dans ce scénario, une première génération d'étoiles serait née au sein de nuages de petite dimension, mais elles n'auraient pas été capables de constituer un amas viable : elles se seraient dispersées et constitueraient aujourd'hui une partie des étoiles isolées du halo. C'est un peu plus tard, après qu'un nombre suffisant de petits nuages aient fusionné pour former des nuages de plus en plus gros, et finalement constituer des nuages moléculaires supergéants, que de véritables amas globulaires seraient nés. Des collisions entre nuages pourraient, comme dans le modèle d'Harris et Pudritz, déclencher la formation d'étoiles supplémentaires. Ce scénario a le mérite d'expliquer pourquoi certaines étoiles du champ ont une métallicité⁴ plus faible que les amas globulaires : les amas naîtraient dans des nuages enrichis en « métaux » par la première génération d'étoiles.

Récemment, une autre théorie de formation des amas globulaires a vu le jour à l'IAGL : il s'agit du scénario EASE (Evaporation, Accretion, Self-Enrichement), dont on trouvera une présentation en annexe.

c. *Les scénarios tertiaires*

Les scénarios envisagés jusqu'ici ne permettent pas d'expliquer la présence d'amas dans le disque. On pense généralement que ces derniers se sont formés au moment où le disque de notre Galaxie était encore épais — stade intermédiaire entre le sphéroïde gazeux initial et le disque fin qu'on observe aujourd'hui. Pour expliquer en détail la formation de ces amas, on peut évidemment reprendre des modèles dits « secondaires » en les appliquant à un disque épais et non plus à une sphère de gaz, à condition bien sûr que ceux-ci permettent la formation d'amas globulaires dans un environnement enrichi en métaux (ce qui n'est

pas le cas de tous !). On peut aussi imaginer la formation des étoiles à partir de nuages de gaz comprimés lorsqu'ils traversent le disque épais, ou lors d'une collision entre une petite galaxie-satellite et notre Galaxie encore au stade du disque épais.



M54, un des amas de la galaxie naine du Sagittaire.

Un type plus extrême de scénario tertiaire est la fusion. Certains amas, dont le célèbre ω Cen, sont probablement des noyaux de galaxies elliptiques naines avalées par notre propre Galaxie, et dont les autres étoiles se sont été évaporées (voir plus haut). Cette théorie ne peut expliquer la présence de tous les amas globulaires de notre Galaxie : en effet, il faudrait que notre Galaxie ait dévoré un nombre extraordinairement élevé de galaxies naines pour parvenir à reproduire la population d'amas globulaires observée aujourd'hui. De plus, seuls des amas de masse élevée seraient ainsi créés. Mais il est certain que ce processus de fusion a eu (et a toujours) lieu. Début 2003, des astronomes rapportaient d'ailleurs la découverte d'une portion d'anneau d'étoiles autour de notre Galaxie. Il pourrait bien sûr s'agir d'un bras spiral éloigné ou du résultat d'une perturbation de notre Galaxie qui aurait poussé vers l'extérieur certaines étoiles. Mais

⁴ Rappel : la métallicité correspond à la proportion d'éléments autres que l'hydrogène et l'hélium.

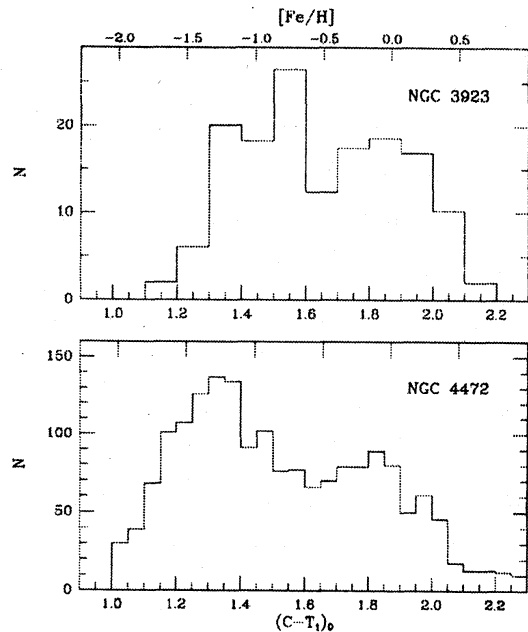
l'hypothèse la plus favorisée est que ces centaines de millions d'étoiles vieilles et disposées en anneau épais proviendraient de petites galaxies avalées par la nôtre il y a 10 milliards d'années. Au même moment, on découvrirait aussi que notre voisine et presque jumelle M31, la galaxie d'Andromède, présente des traînées d'étoiles de même composition chimique et de vitesses similaires qui proviendraient elles aussi de « collisions » avec des galaxies naines. Et il existe un exemple de cannibalisme par notre Galaxie que nous pouvons suivre « en direct » : la galaxie naine du Sagittaire, déjà évoquée, perd petit à petit ses étoiles périphériques. Son cœur deviendra un amas globulaire énorme, tandis que ses étoiles périphériques et du champ iront grossir la population des étoiles du champ de la galaxie cannibale... Le cannibalisme galactique existe donc bien, et il a très probablement une importance non négligeable dans la construction du halo. Et n'oublions pas que ces galaxies « avalées » par la nôtre possèdent parfois elles-mêmes des amas globulaires, qui viendront évidemment se joindre à la cohorte galactique.

Si on considère généralement que les amas du halo « vieux » sont propres à notre Galaxie, et sont nés en même temps qu'elle, le halo « jeune » serait constitué d'amas capturés par la Voie Lactée. Néanmoins, et ce malgré leur nom, la présence d'amas capturés ne facilite pas l'analyse, car ces amas peuvent en réalité être assez vieux — aussi vieux que les amas indigènes... Il devient donc assez difficile de séparer ces populations et de se concentrer uniquement sur les amas propres à notre Galaxie !

Et ailleurs dans l'Univers...

Notre Galaxie n'est pas la seule à posséder des amas globulaires. M31, la galaxie d'Andromède, possède quelque 450 amas globulaires fort semblables aux nôtres — quoique en moyenne plus riches en métaux. Les célèbres Nuages de Magellan hébergeraient à eux deux une quinzaine d'amas, mais aussi peut-être de jeunes amas globulaires (cette proposition est cependant controversée, car certains de ces amas jeunes seront détruits

avant d'atteindre le stade d'amas globulaire : peut-on dans ce cas leur donner le nom de « jeunes » amas ?).



Distribution de couleur des amas de NGC3923 et 4472, deux galaxies elliptiques : remarquez les deux pics.

Parmi les neuf galaxies naines, satellites de la Voie Lactée, que cette dernière est en train d'avaloir, seules deux possèdent des amas : celle de la constellation du Fourneau (5 ou 6 amas) et la galaxie naine du Sagittaire (4 amas, dont M54).

Grâce aux puissants télescopes actuels, on peut même en voir bien plus loin, et d'âges différents : de vieux amas semblables aux nôtres, et des amas plus jeunes, en formation notamment dans des galaxies en collision. Il faut cependant se rendre compte que les énormes distances qui entrent en jeu ne facilitent pas leur observation : pour un amas globulaire situé à la distance de l'amas de galaxies de la Vierge, soit 52 millions

d'années-lumière, la magnitude visible⁵ minimale (c'est-à-dire la luminosité maximale) d'un amas sera de 21, et son rayon de quelques millièmes du diamètre de la Lune ! Il n'est donc plus question ici d'en étudier les composantes en détails. Malgré tout, l'observation des amas extragalactiques a pu fournir quelques résultats importants :

- le pic de la fonction de luminosité est pratiquement toujours situé à la même magnitude (cf. partie I) ;
- la distribution spatiale des amas est au moins aussi étendue que celle du corps de la galaxie elle-même ;
- la distribution de la couleur des amas des galaxies elliptiques présente deux pics qui correspondraient à deux populations de métallicités différentes, ce qui renforce de nouveaux scénarios de formation pour ces galaxies (voir ci-dessous) ;
- les amas des galaxies elliptiques sont plus rouges, donc possèdent plus de métaux, que ceux des galaxies spirales.⁶

Mais l'étude des amas extragalactiques, et plus particulièrement l'observation des différences entre amas globulaires des galaxies spirales et des galaxies elliptiques, sert aussi à tester des modèles de formation galactique qui tentent d'expliquer les différences entre ces galaxies.

Une première théorie utilise la formation par effondrement d'un nuage de gaz avec formation rapide d'étoiles (cf. plus haut). Si, à la fin de cette période, il reste encore du gaz non transformé en étoiles, on peut former graduellement et plus tardivement de nouvelles générations d'étoiles : on a affaire à une galaxie spirale. Si la première génération a épuisé tout le gaz disponible, alors le résultat sera plutôt une galaxie elliptique.



NGC3256, deux galaxies en interaction vues par le télescope spatial Hubble : de nombreux amas globulaires sont visibles comme des objets brillants et compacts.

Un second modèle assure que les galaxies elliptiques proviennent de la fusion de galaxies spirales semblables à la nôtre⁷. La naissance de très nombreuses nouvelles étoiles résulterait de cette fusion (en anglais, on parle de *starburst*), ce qui consommerait tout le gaz restant. Dans ce cas, la nouvelle galaxie elliptique héberge, en plus des amas présents dans chacune des galaxies spirales, de nouveaux amas nés lors de la fusion. Ce mécanisme permet d'expliquer pourquoi on observe deux à trois fois plus d'amas par unité de masse dans les galaxies elliptiques que dans les galaxies spirales. De plus, ces nouveaux amas naissent dans un gaz enrichi en métaux par les générations précédentes, et ont donc une métallicité plus importante. Dans une galaxie elliptique, on

⁵ Rappelons qu'à l'oeil nu, nous pouvons voir des étoiles jusqu'à la magnitude 6, et que la brillante Véga a une magnitude 0.

⁶ Leur différence de couleur pourrait aussi être due à des différences d'âge, mais les âges nécessaires pour expliquer les observations seraient alors énormes. De petites différences d'âge existent bel et bien entre amas d'une même galaxie ou entre amas de galaxies différentes, ce qui empêche de transformer facilement ces mesures de couleur en valeurs absolues de métallicité.

⁷ Pour la petite histoire, notons que la Voie Lactée et la galaxie d'Andromède se ruent l'une vers l'autre à une vitesse de 500.000 km/h : elles devraient entrer en collision dans 3 milliards d'années environ, un spectacle assurément impressionnant. Les scénarios évoqués ci-dessous pourraient donc s'appliquer à cette future « super-galaxie ».

n'observe donc pas une seule métallicité, mais au moins deux — d'où le double pic de la distribution de couleur ! Enfin, la métallicité moyenne du système d'amas d'une galaxie elliptique est plus élevée que celle des galaxies spirales, ce qui explique leur couleur plus rouge ! Toutes ces prédictions du modèle de fusion sont donc vérifiées. Il faut cependant noter que ce modèle simple n'est pas suffisant pour rendre compte des observations de façon détaillée, il faut tout d'abord que les galaxies spirales de départ présentent de légères différences avec celles que l'on observe aujourd'hui. D'autres petits problèmes existent, mais peuvent être contournés :

- le pic de métallicité faible correspond à une valeur de la métallicité supérieure à la moyenne observée dans les galaxies spirales, alors que les amas de faible métallicité sont censés provenir de ce type de galaxies. Nuançons quelque peu ce résultat : la valeur de la métallicité des galaxies spirales est loin d'être universelle. De plus, comme certains amas ont disparu avec le temps, il est très difficile d'en connaître la valeur intrinsèque !

- l'existence des galaxies elliptiques les plus massives ne peut s'expliquer qu'en invoquant des fusions multiples : comme ces dernières se produisent à des moments différents, ce sont des amas de métallicités différentes qui vont naître au cours du temps ; chaque génération apporte donc sa contribution, et il devient difficile de déceler les traces des fusions individuelles : les deux pics dans la distribution de métallicité disparaissent.

- dans les scénarios de fusion simple, le nombre total d'amas d'une galaxie par unité de masse doit augmenter, puisque des amas sont créés lors de la fusion. Ce doit aussi être le cas de la métallicité : plus la métallicité moyenne est élevée, et plus le nombre d'amas formés lors de la fusion a dû être important. Cette tendance n'est pas observée en pratique ; de plus, le nombre d'amas de faible métallicité par unité de masse devrait être comparable à celui des spirales, ce qui n'est pas le cas par exemple pour M87 ! Cependant, on peut résoudre une partie de ces problèmes en faisant appel à des fusions avec des galaxies naines ; en effet, le nombre d'amas par unité de masse est plus élevé dans ce type de galaxie que dans les galaxies spirales.

Même si on choisit un modèle de fusion « amélioré », tous les problèmes ne sont pas réglés pour autant : comment par exemple les nouveaux amas naissent-ils exactement lors de la fusion ? On sait que ce phénomène existe, puisqu'on l'observe dans de nombreuses galaxies en interaction, mais le mécanisme exact n'est pas bien compris. Y aurait-il des collisions entre « super-nuages » ? Il devrait dans ce cas y avoir davantage d'interactions, donc plus d'amas globulaires dans des environnements galactiques denses... mais l'observation de cette tendance reste sujette à controverse. De plus, ce scénario prédit une masse moyenne des amas plus élevée si la masse de la galaxie-hôte est plus grande... alors que le fameux pic de luminosité est toujours au même endroit. Enfin, certaines galaxies, comme celle de la constellation du Fourneau, sont dans les scénarios actuels en-dessous du seuil de formation des amas globulaires... mais elles abritent néanmoins ce type d'objets !

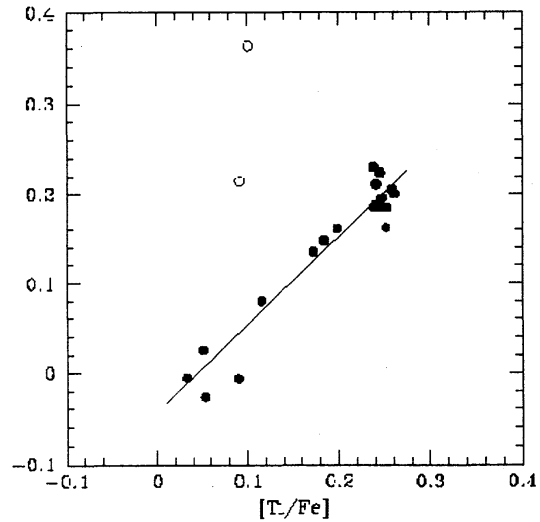
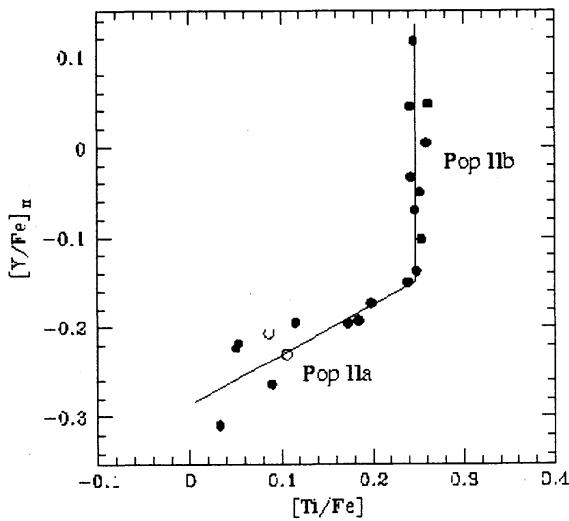
Bref, si les amas globulaires sont des outils incomparables pour l'étude des étoiles, des galaxies et de leurs interactions, nous sommes bien loin de tout comprendre : avis aux (futurs) astronomes motivés !

Annexe

Le scénario EASE de l'IAGL

L'intérêt principal du scénario EASE est qu'il permet d'expliquer la formation des amas et l'origine de leur composition chimique. Il repose sur des observations assez surprenantes de la composition chimique détaillée des étoiles du champ.

On constate que le rapport des abondances europium/fer ([Eu/Fe]) dans ces étoiles augmente avec le rapport titane/fer ([Ti/Fe]) (voir graphique ci-contre). D'autre part, le rapport titane/fer ne dépasse pas une certaine limite. Le titane est un *élément alpha* : il est constitué d'un nombre entier de particules alpha, le noyau d'hélium. L'euporium est un *élément r*, et l'yttrium un *élément s* : le premier est créé lors de la capture rapide (*r*) de neutrons, par exemple lors de l'explosion d'une supernova ; le deuxième par capture lente (*slow, s*) de neutrons, par exemple lors des phases de la branche asymptotique des géantes (AGB, voir la première partie de cet article).



Les étoiles du champ ne peuvent pas avoir elles-mêmes produit ces éléments et ces résultats paraissent donc bien étranges, ce qui a poussé les astronomes liégeois à réinventer les scénarios dits *d'auto-enrichissement* (*Self-Enrichment*).

Reprenant le modèle de Fall et Rees, les astrophysiciens de l'IAGL ont imaginé qu'une première génération d'étoiles était apparue dans les nuages froids. Après quelques millions d'années, les étoiles massives donnent naissance à des supernovæ. L'onde de choc produite par les explosions est capable de repousser le milieu interstellaire, ce qui fait apparaître une coquille de gaz dense, enrichie en éléments *r* et *alpha*. Dans cette « coquille » en expansion, le gaz perturbé donne naissance à une seconde génération d'étoiles. Si le jeune amas ne résiste pas aux nombreuses explosions de supernovæ et ne se contracte pas ensuite, l'amas est dit « avorté », et ses étoiles viennent remplir le halo de notre Galaxie. Dans le cas contraire, après quelque temps les étoiles massives de seconde génération explosent elles aussi, mais leur influence est devenue maintenant négligeable, car presque tout le gaz présent a été utilisé pour former la seconde génération, et il ne reste plus de matière interstellaire à perturber. Un peu plus tard, c'est au tour des étoiles de masses intermédiaires

d'évoluer : elles atteignent le stade AGB, et elles contaminent par leurs vents stellaires l'amas en éléments *s* qu'elles ont synthétisés.

Les étoiles voisines sont capables de collecter ces polluants, changeant ainsi leur composition superficielle. On peut donc trouver différentes espèces d'étoiles du champ :

- Les étoiles de *population IIa* : ce sont des étoiles qui ont été chassées de l'amas avant ou pendant la première phase d'explosion des supernovæ. Leur contenu en éléments *alpha* dépend donc du moment précis de leur éjection.
- Les étoiles de *population IIb* : lorsque toutes les étoiles de première génération de masse au moins égale à 9 masses solaires ont explosé en supernovæ, l'enrichissement en éléments *r* et *alpha* est maximum, mais la contamination en éléments *s* va seulement avoir lieu. Le rapport titane/fer atteint donc sa limite supérieure alors que le rapport yttrium/fer peut encore augmenter pendant la phase AGB des étoiles de seconde génération. Les étoiles de population IIb sont celles qui ont été éjectées de l'amas pendant cette période.

Les étoiles du champ correspondraient donc à la prime jeunesse des amas globulaires. Mais on peut se demander ce qu'il advient des étoiles de faible masse appartenant à la première génération. Plusieurs hypothèses sont

envisageables : soit la formation d'étoiles de masse inférieure à 80% de la masse solaire est impossible en l'absence totale de métaux, et donc toutes les étoiles de première génération sont mortes aujourd'hui ; soit elles peuvent se former, et une partie d'entre elles existe toujours, mais elles sont très difficiles à détecter. En effet, la première génération d'étoiles peut naître dans les nuages froids sans qu'il soit besoin de faire appel à un « agent déclencheur » : l'efficacité de formation stellaire est dans ce cas faible, bien plus faible que dans le cas de la « coquille », où le choc causé par les explosions des supernovæ compriment le gaz et déclenchent la création d'étoiles. Trouver une étoile de première génération parmi des centaines d'étoiles de seconde

génération n'est pas évident, et on peut expliquer ainsi leur non-détection. Notons néanmoins que les amas aujourd'hui ont des compositions chimiques homogènes, et donc qu'un bon mélange des éléments est nécessaire, ce qui semble encore poser problème aux scénarios de type « Self-Enrichment ».

Cet article est extrait de Galactée, la revue des Cercles astronomiques montois. Il est reproduit avec l'aimable autorisation de l'auteur et de Galactée.

Pour tout renseignement :

<http://olympus.umh.ac.be>


Tél. 065/37.35.36 ou 065/37.34.68


Fondée en 1925
Fournisseur officiel
de l'Université de Liège
R.C. LG. 158.788
T.V.A. BE 430 667 924

SMALT - OPTIQUE s.a.


rue de la Régence, 19
B -4000 Liège
tél. 042233689
fax 042210025


magasin ouvert de 8.30 à 12 & de 13.30 à 17 heures, lundi excepté





Monture équatoriale





MEADE MAKSUTOV-CASSEGRAIN

