

Amas globulaires (1)

Vous avez certainement déjà rencontré le terme « amas globulaire ». Sous ce vocable se cachent des bijoux du ciel, qui constituent une classe d'objets astronomiques extrêmement importante ! Ce double article tentera d'en dévoiler quelques facettes : découverte, propriétés, importance en astronomie, évolution et formation.

1. La découverte des amas globulaires



ω Centauri.

Le premier amas globulaire a été découvert par Abraham Ihle en 1665 ; il s'agissait de M22 (dans le Sagittaire), mais, tout comme les suivants, on le prit d'abord pour une nébuleuse ordinaire. Peu de temps après, Edmund Halley découvre ω Centauri, le plus gros amas globulaire de notre galaxie. Ce dernier avait déjà été observé, mais on pensait jusque là qu'il s'agissait d'une « simple » étoile. Les découvertes

s'enchaînent ensuite de plus en plus rapidement : M5 est observé en 1702 par Gottfried Kirch, M13 en 1714 à nouveau par Halley... Dans le fameux catalogue établi par Messier en 1781, on compte 29 amas, dont 20 sont de nouvelles découvertes. Charles Messier est le premier à résoudre un amas globulaire, M4, en ses composantes, les étoiles, mais il ne perçoit pas leur nature réelle et continue à les appeler « nébuleuses rondes ». Notez qu'un des amas de Messier, M54, n'appartient pas à notre galaxie¹.

En 1782, William Herschel, le grand astronome anglais, entama un recensement systématique du Ciel, ce qui lui permit notamment de trouver une quarantaine de nouveaux amas. Il fut le premier à



Vue générale de la constellation d'Hercule, qui contient M13, l'un des amas globulaires les plus célèbres.

¹ M54 appartient à la galaxie naine du Sagittaire, une galaxie satellite de la nôtre qui est en train de se faire « cannibaliser ».

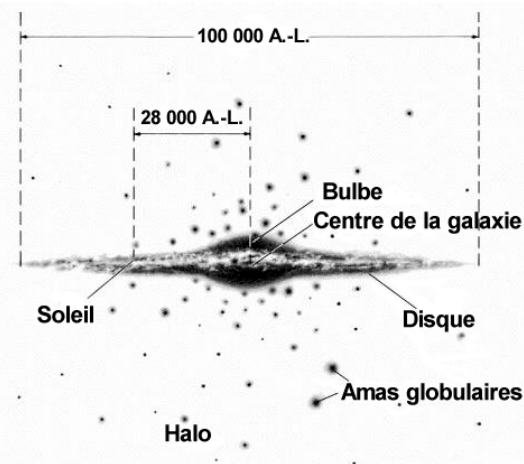
résoudre tous les amas connus en étoiles et c'est d'ailleurs lui qui forgea le terme d'« amas globulaire ». Aujourd'hui, on connaît environ 150 amas dans notre galaxie, mais il y en aurait en réalité probablement près de 200 au total : certains amas, situés de l'autre côté du bulbe galactique, sont extrêmement difficiles à détecter. Après les travaux d'Herschel, les astronomes ont supposé que ces amas sont des agglomérats d'étoiles dont la cohésion est assurée par les forces de gravitation. Mais on n'en a eu la preuve que bien plus tard, avec l'avènement de la spectroscopie, qui a montré que les vitesses stellaires sont bien conformes à cette image. Une autre preuve est venue de l'examen des diagrammes de Hertzsprung-Russel (HR, voir plus loin), qui montrent sans ambiguïté que ces amas sont constitués d'une seule population d'étoiles de même âge et de même composition chimique².

2. Qu'est-ce qu'un amas globulaire ?

Mais que sont donc ces amas en réalité ? Il s'agit de gigantesques associations d'étoiles : les amas globulaires contiennent de dix mille à un million d'étoiles dans un volume extrêmement petit (une sphère d'un diamètre de quelques dizaines à quelques centaines d'années-lumière). La masse de ces amas, mille fois à deux millions³ de fois la masse du Soleil, les situe entre les amas ouverts et les galaxies naines. Au centre de ces amas, on peut atteindre des densités stellaires de l'ordre de mille étoiles par année-lumière au cube⁴ ! Les amas globulaires de la Voie Lactée sont très vieux : on estime que leur âge est compris entre 10 et 20 milliards d'années. La moitié d'entre eux sont localisés dans un rayon de 16 000

années-lumière autour du centre de la Galaxie, et la quasi-totalité se trouve dans une sphère de 65 000 années-lumière centrée sur le centre galactique. Il existe néanmoins un amas qui bat tous les records, AM-1, situé à 390 000 années-lumière du centre galactique, soit plus de deux fois la distance des Nuages de Magellan, deux galaxies satellites de la nôtre !

On distingue deux groupes principaux parmi les amas globulaires de notre galaxie : ceux du halo et ceux du disque. Les amas du disque, les moins nombreux, sont plus concentrés près du disque et du bulbe de notre galaxie. Leur



Vue schématique de notre galaxie.

² Ou, comme disent les astronomes, de même *métallicité*. Pour les astronomes, tout ce qui n'est ni hydrogène ni hélium est un « métal ». Le contenu massique d'un objet en « métaux » s'appelle la métallicité et se note *Z* (les lettres *X* et *Y* sont utilisées pour le contenu en hydrogène et en hélium). Juste après le Big Bang, la métallicité était pratiquement nulle, et elle a progressivement augmenté grâce à la création de métaux par les générations successives d'étoiles.

³ Pour ω Centauri.

⁴ Rappelons que l'étoile la plus proche du Soleil en est distante de 4 années-lumière !

distribution est plutôt aplatie, et ils ne s'éloignent pas plus de 26 000 années-lumière du centre galactique et de 13 000 années-lumière du plan galactique. Ces amas ont une vitesse orbitale assez importante (environ 150 km/s) et ils gravitent tous autour du centre galactique. Leur métallicité est comparable ou légèrement inférieure à la métallicité solaire (avec un minimum d'un dixième). Ces amas sont très probablement associés au bulbe et au disque, et se seraient formés en même temps que ceux-ci (voir plus loin).

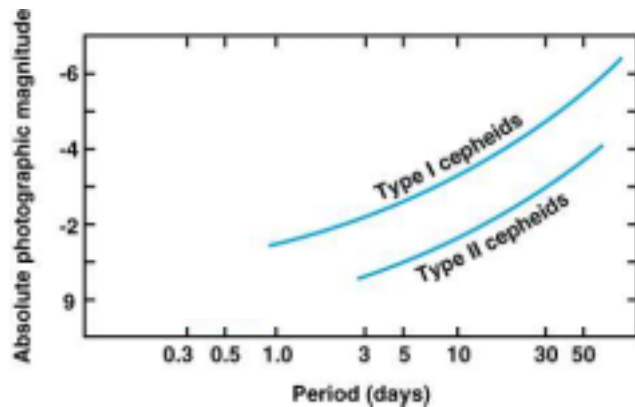
Les amas du halo se distribuent de façon plus ou moins sphérique autour du centre galactique. Leur vitesse est plus faible (environ 50 km/s) et la rotation nette de ce système est pratiquement nulle : de nombreux amas tournent en effet « dans le sens opposé » (mouvement rétrograde) à la rotation globale de la Galaxie. Ces objets sont bien moins riches en métaux que le premier groupe : leur métallicité varie d'un centième à un dixième de la métallicité solaire. En réalité, ce deuxième groupe se décompose probablement en deux sous-groupes, le « halo jeune » et le « halo vieux » (dont la dispersion des âges est pratiquement nulle). Nous reparlerons plus tard de cette dichotomie.

N'oublions cependant pas une composante très importante du « halo » de notre galaxie : les étoiles isolées. Les amas globulaires ne contiennent en effet qu'un centième des étoiles du halo (soit quelques centièmes de la masse totale du halo) ! Les propriétés de ces étoiles isolées, dites *du champ*, sont fort similaires à celles des amas globulaires du halo : elles sont distribuées de façon sphérique, la rotation globale du système est pratiquement nulle, la métallicité moyenne est proche de celle des amas du halo... Comme nous le verrons plus loin, on considère généralement que ces étoiles sont intimement liées à la formation des amas globulaires. Néanmoins, la distribution de la métallicité de ces étoiles a une forme assez différente de celle des amas du halo, et on trouve des étoiles du champ dont la métallicité est inférieure à celle des amas de métallicité la plus faible.

3. L'utilité des amas globulaires en astrophysique

Mis à part leur évident attrait de joyau céleste, les amas globulaires sont très vite apparus comme des laboratoires astronomiques exceptionnels : dès le début de leur étude, ils ont révolutionné notre vision de l'Univers.

Au début du XX^e siècle, si la Terre n'est plus le centre de l'Univers depuis plusieurs siècles déjà, le Soleil trône toujours au centre de la Galaxie ! Dès 1830 pourtant, John Herschel, le fils du grand William, découvre qu'un grand nombre d'amas se trouvent préférentiellement dans une petite partie du ciel centrée sur la constellation du Sagittaire. En 1909, l'astronome suédois Karl Böhlin découvre lui aussi que plus de 90 % des amas sont localisés dans une seule moitié du ciel. Si les amas globulaires sont distribués symétriquement autour du centre galactique, cela veut donc dire que le Soleil n'est pas au centre, mais à la périphérie de notre galaxie. Malheureusement, les théories de Böhlin étaient remplies de bizarreries et on oublia cette importante partie de ses travaux : il faudra attendre encore un peu pour détrôner le Soleil. En 1918, Harlow Shapley étudie les étoiles variables dans les



Relation période-luminosité des céphéides.

amas globulaires et, en présumant que ce sont des céphéides⁵, il détermine les distances de ces amas. En supposant encore une fois que les amas sont distribués symétriquement autour du centre galactique, Shapley déduit alors la taille de notre galaxie et la distance entre le Soleil et le centre galactique ; il obtient des valeurs dix fois plus grandes que celle de

Bohlin. Malheureusement, les étoiles variables de Shapley n'étaient pas des céphéides, mais des étoiles RR Lyrae. Cet autre type d'étoile variable est intrinsèquement moins lumineux que les céphéides, et les distances trouvées par Shapley étaient en fait deux fois trop grandes : au lieu d'observer un phare situé très loin, il avait affaire à une bougie située bien plus près. Mais cela n'enlève rien à la conclusion de son travail : notre anthropocentrisme a pris du plomb dans l'aile !

Les amas globulaires nous apportent des dizaines d'autres informations, dont chacune a pu ou peut encore à elle seule révolutionner l'astrophysique :

- ✓ *la formation des galaxies* : en 1940, Baade sépare les étoiles en *population I* (celles du voisinage du Soleil) et *population II* (les étoiles des amas globulaires). Très vite, on démontre que les étoiles de population II sont extrêmement vieilles. Probablement créées



47 Tucanae et le Petit Nuage de Magellan.

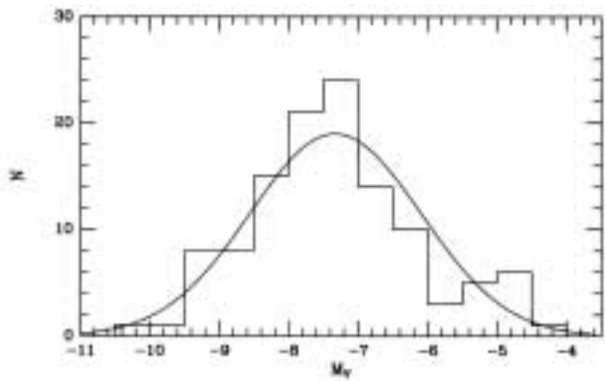
en même temps que notre galaxie, ces reliques primordiales nous donnent donc des informations sur la façon dont se sont formées les galaxies !

- ✓ *la cosmologie* : l'Univers ne peut évidemment être plus jeune que l'une quelconque de ses composantes. L'âge des plus vieux amas nous donne donc une borne inférieure pour l'âge de l'Univers. Le seul problème est que la détermination de l'âge absolu des amas globulaires est entachée de nombreuses erreurs : erreurs

⁵ Les céphéides sont des étoiles variables : leur luminosité varie régulièrement, et il existe un lien étroit, bien connu et mis en évidence par Henrietta Leavitt, entre la période des oscillations et la luminosité moyenne de l'étoile. Si l'on observe une céphéide, on peut facilement mesurer sa période de pulsation et donc en déduire la luminosité intrinsèque de l'étoile qui, comparée à la luminosité observée sur Terre, permet finalement de calculer la distance de l'étoile.

sur les distances et sur le contenu en métaux – ces deux types d’erreurs sont aujourd’hui en constante diminution –, erreurs surtout au niveau des modèles théoriques.

- ✓ *l’évolution stellaire* : les étoiles d’un même amas sont toutes situées à la même distance du Soleil. Elles sont de plus toutes nées en même temps, d’un même matériau, et ne diffèrent que par leurs masses respectives. La population des amas constitue donc un test direct pour les théories de l’évolution stellaire.
- ✓ *la dynamique stellaire* : la densité élevée au cœur des amas fait que les étoiles y sont en constante interaction, ce qui permet de tester les modèles dynamiques.



Distribution de la luminosité des amas globulaires dans une galaxie.

- ✓ *la détermination des distances* : comme on le verra plus loin, la distribution de la luminosité des amas a une forme à peu près gaussienne, et le maximum correspond toujours à une même luminosité absolue, quelle que soit la galaxie étudiée. Certains astronomes ont suggéré d'utiliser cette propriété pour déterminer les distances des galaxies lointaines jusqu'à plus de 100 millions de

parsecs : les amas globulaires, nouvelles chandelles standards ?

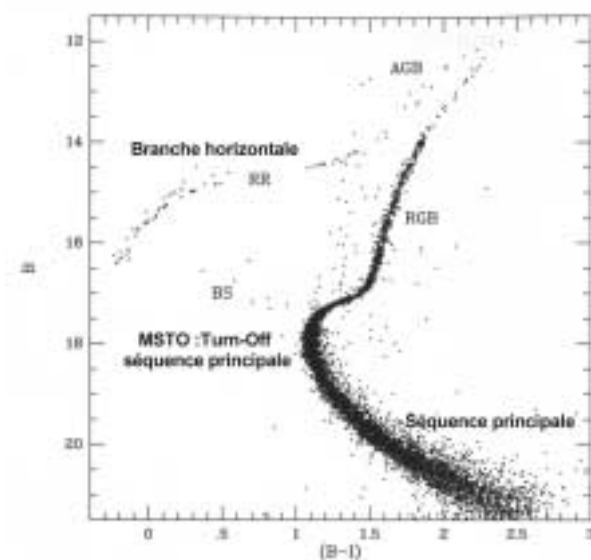
4. Le diagramme HR des étoiles des amas globulaires

Une des premières analyses faites sur les amas consiste à représenter leurs étoiles dans un diagramme HR (ou diagramme couleur-magnitude). Ce diagramme, imaginé indépendamment par le Danois Hertzsprung et l'Américain Russell, dont les initiales servent encore aujourd'hui à le désigner familièrement, est un outil apprécié des astrophysiciens, car il permet de mettre en évidence de nombreux effets de façon très simple. Dans un diagramme HR, l'axe des abscisses représente la température⁶ (ou la couleur) des étoiles, et l'axe des ordonnées leur luminosité absolue. Une grosse étoile bleue, très brillante et très chaude (température de surface de 50 000 K) sera donc représentée par un point situé en haut et à gauche du diagramme, et une petite étoile rouge, peu brillante et comparativement froide (température de surface de 3 000 K) par un point en bas et à droite. Hertzsprung et Russell ont découvert que les étoiles ne se disposaient pas au hasard sur le diagramme, mais qu'elles y occupent des positions bien précises qui dépendent de leur masse, de leur âge et de leur métallicité.

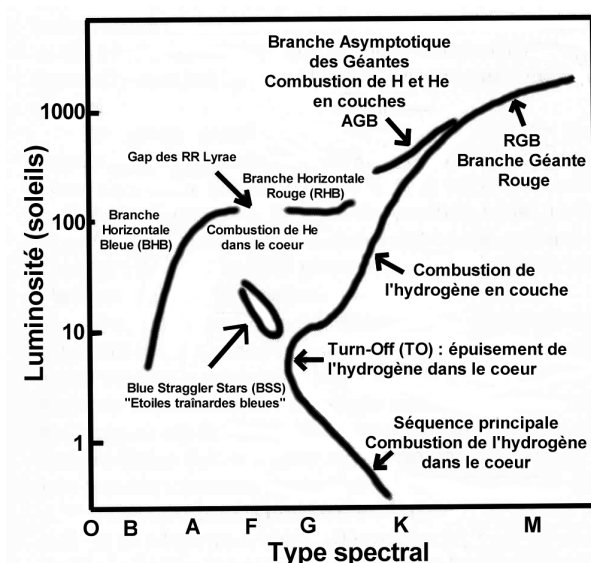
⁶ L'axe des températures est orienté de façon peu conventionnelle : les températures croissent de la droite vers la gauche !

Lorsque l'on positionne toutes les étoiles d'un même amas dans un diagramme HR, on obtient un dessin similaire au schéma ci-dessous. Toutes les étoiles de l'amas ont le même âge et la même composition chimique, et ne diffèrent entre elles que par leur masse. On distingue plusieurs zones dans ce diagramme :

- ✓ la *séquence principale* (en anglais *main sequence, MS*) : elle correspond à « l'âge adulte » des étoiles. Comme notre Soleil, celles-ci assurent leur production d'énergie en brûlant de l'hydrogène dans leur cœur et en le transformant en hélium.
- ✓ le *turn-off (TO)* : les étoiles ne brûlent pas éternellement de l'hydrogène. Quand l'hydrogène commence à faire défaut dans le cœur de l'étoile, celle-ci quitte la séquence principale pour entamer une nouvelle phase de son évolution : son point représentatif s'éloigne de la séquence principale dans le diagramme HR. Ce mécanisme se traduit dans



Haut : diagramme HR de l'amas globulaire M5 ; bas : identification sur un diagramme schématisé du stade atteint par les différentes étoiles de l'amas.



le diagramme par l'apparition d'un « coude », qui en anglais porte le nom de *turn-off*. Dans les amas globulaires, les étoiles du turn-off ont une masse d'environ 80 % de celle du Soleil.

- ✓ la *branche des géantes rouges (RGB)* : lorsque la fusion de l'hydrogène, et donc la production d'énergie dans le cœur, cesse, celui-ci se contracte sous l'effet des forces de gravitation et s'échauffe. Autour de ce cœur en contraction, une mince couche d'hydrogène, jusque là inerte, se réchauffe et commence à brûler. Pendant ce temps, l'enveloppe, instable, se dilate de façon extraordinaire : la surface se refroidit et l'étoile prend l'aspect d'une géante rouge (très brillante mais plus froide, donc localisée en haut et à droite du diagramme HR).

- ✓ la *branche horizontale (HB)* : dans le cœur en contraction, la température augmente jusqu'à

atteindre 100 millions de degrés : la fusion de l'hélium commence alors dans le cœur, c'est une nouvelle phase de calme pour l'étoile ; l'hélium du cœur se transforme progressivement en carbone. À ce stade, certaines étoiles traversent une zone d'instabilité pendant laquelle l'étoile est animée de pulsations : c'est le stade RR Lyræ.

- ✓ la *branche asymptotique des géantes (AGB)* : lorsque l'hélium se met à manquer dans le cœur, l'étoile entame une phase similaire à celle des géantes rouges : le cœur devenu inerte se contracte, et la combustion de l'hydrogène et de l'hélium ne persiste que dans deux couches entourant le cœur. L'enveloppe se dilate à nouveau et, sur le diagramme HR, l'étoile tend à rejoindre la branche des géantes. Les étoiles de faible masse, comme celles qui subsistent actuellement dans les amas globulaires, ne pourront jamais atteindre le seuil de combustion du carbone dans leur cœur. Après la phase AGB, elles éjectent leurs couches extérieures, qui forment une nébuleuse planétaire, et leur cœur se transforme en naine blanche.

Il faut noter que si des étoiles doubles de l'amas ne sont pas résolues, on le remarque assez facilement dans le diagramme HR : s'il s'agit par exemple de deux étoiles adultes de masses comparables, le couple se placera juste au-dessus de la séquence principale ; en effet ces étoiles ont la même température, mais la luminosité du couple est double de celle d'une étoile individuelle de mêmes caractéristiques. On peut ainsi estimer la fraction de binaires présentes dans les amas.

Le premier paramètre qui influence la forme globale du diagramme HR des amas globulaires est leur métallicité. En effet, l'opacité augmente avec la métallicité et donc la température de surface diminue : les étoiles sont plus rouges. La relative finesse de la séquence principale et de la branche des géantes montre que les étoiles d'un même amas ont des métallicités très proches. Malgré cette similitude, il arrive que les étoiles d'un même amas présentent de petites différences de composition chimique : en effet, au cours de leur évolution, certains éléments chimiques « légers » (carbone, azote, oxygène, sodium, aluminium, ...) créés dans le centre des étoiles peuvent remonter par convection à la surface, la polluer et en changer la composition chimique⁷. Mais de réelles et importantes variations de métallicité sont observées dans certains amas. Parmi les exceptions notables, il y a les célèbres ω Centauri et M22 : la façon dont se sont créés ces amas est probablement responsable de ce phénomène, comme nous le verrons dans le prochain numéro de *Galactée*.

Pour mieux classer les amas, les astrophysiciens ont défini un paramètre particulier, C , qui est relié à la morphologie de la branche horizontale :

$$C = (B - R) / (B + V + R),$$

où R est le nombre d'étoiles du côté rouge de la branche horizontale, B le nombre d'étoiles du côté bleu, et V le nombre d'étoiles de type RR Lyræ, c'est-à-dire situées dans la lacune d'instabilité qui sépare les zones bleue et rouge. On s'est bien vite rendu compte que le

⁷ La spectroscopie permet d'obtenir assez facilement la composition chimique de la surface des étoiles.

paramètre C variait d'un amas à l'autre. Le premier paramètre qui influence C a été rapidement découvert : c'est comme nous venons de le voir la métallicité Z . Mais il existe des amas de même métallicité dont les branches horizontales ont des morphologies différentes ! La question de savoir quel est le « deuxième paramètre » qui influence la valeur de C suscite depuis 40 ans un débat intense parmi les astronomes ! Il pourrait s'agir de l'âge, qui tend à peupler le côté bleu de la branche horizontale ; de l'abondance en hélium qui, en diminuant l'opacité, avantagerait elle aussi le côté bleu ; de l'abondance en carbone, en azote et en oxygène, qui privilégierait au contraire le côté rouge ; ou encore d'une éventuelle rotation du cœur de l'étoile qui, comme l'indiquent les simulations, favoriserait le côté bleu. Aujourd'hui, il fait peu de doute que l'âge est le fameux second paramètre, ou est en tous cas un facteur déterminant ; mais il ne suffit pas à tout expliquer : il faut donc ajouter au moins un troisième paramètre pour mieux comprendre la branche horizontale.

Enfin, il existe un groupe surprenant dans le diagramme HR : ce sont les fameuses *Blue Stragglers*⁸ (BS). Sur le diagramme ci-dessus, on observe la présence de quelques étoiles dans le prolongement de la séquence principale. Or, on a vu plus haut que les étoiles plus massives (et donc plus lumineuses) que celles du TO se sont détachées de la séquence principale et sont devenues des géantes rouges... Découvertes il y a 50 ans par Allan Sandage dans l'amas M3 dans le cadre de son travail de thèse de doctorat, les *blue stragglers* sont restées assez anecdotiques jusqu'au lancement du télescope spatial Hubble. Depuis lors, on en connaît de nombreux exemples, et il ne s'agit donc pas d'un artefact résultant d'une quelconque erreur de calibration : ces étoiles étranges existent bel et bien, alors que tout indique qu'elles devraient être en train de mourir – ou même être déjà mortes !

Plusieurs scénarios permettant d'expliquer leur existence ont été proposés : certains supposent qu'il s'agit d'étoiles isolées, d'autres jouent sur les propriétés des étoiles binaires.

Dans le premier groupe, on trouve diverses hypothèses plus ou moins fantaisistes : les *blue stragglers* se seraient formées plus tard que les autres étoiles de l'amas ; leur vie sur la séquence principale serait allongée par un mélange interne plus efficace des éléments chimiques ; elles seraient les seules étoiles à ne pas perdre de masse par éjection d'un vent stellaire ; elles auraient accumulé du gaz résiduel présent dans l'amas ; ce seraient des étoiles évoluées qui, pour une raison inconnue, retourneraient sur la séquence principale ; ou encore, il s'agirait d'étoiles jeunes du champ capturées par l'amas.

Parmi les propositions du second groupe, on pense aux étoiles cannibales, dont une des composantes serait en train d'avaler une partie de sa compagne ; et aux binaires de contact ou à enveloppe commune qui peuvent finalement fusionner. Cependant toutes les étoiles BS ne font pas partie de systèmes binaires, ce qui semble exclure que le scénario de binaires cannibales soit seul à l'œuvre. Longtemps négligées, les collisions au sein des amas ont récemment repris de l'importance : les BS sont en effet concentrées dans le cœur des amas, où

⁸ En français, « traînardes bleues » ! En effet, ces étoiles semblent s'être attardées au voisinage de la séquence principale, et résister aux changements de couleur et de luminosité qui affectent leurs sœurs.

la densité importante des étoiles permet d'envisager des collisions entre celles-ci. Depuis 15 milliards d'années, des centaines de collisions directes auraient ainsi pu se produire dans le cœur des amas globulaires ! Comme la distribution de luminosité des BS diffère suivant la masse de l'amas, les scénarios de collision doivent être dominants, mais il semble que la forme exacte de cette distribution ne puisse s'expliquer qu'en envisageant des scénarios complémentaires. Le mécanisme de transfert de masse aurait donc son importance, surtout dans la périphérie des amas, et la fusion dominerait dans les amas de faible masse, où les collisions sont plus rares.

Dans la deuxième partie de cet article, vous découvrirez que les amas globulaires ne sont pas des objets statiques : ils évoluent et peuvent même être détruits. Le mystère de leur formation sera aussi abordé, ainsi que la découverte d'autres amas globulaires dans des galaxies plus ou moins proches...

Yaël Nazé (IAGL)



Un gros plan de l'amas globulaire 47 Tucanae.