

Soleil, par exemple, émet 4×10^{26} watts de rayonnement électromagnétique (essentiellement sous forme de lumière visible), ce qui équivaut à quatre millions de tonnes de matière transformées en énergie chaque seconde. Ainsi, chaque seconde, 600 millions de tonnes d'hydrogène sont transmutes en 596 millions de tonnes d'hélium.

À ce rythme, le Soleil brûle environ un pour cent de sa masse en un milliard d'années. Étant donné que seuls dix pour cent de la masse du Soleil seront utilisables comme combustible (c'est la proportion qui atteint, au centre de l'étoile, la température et la densité nécessaires), le Soleil tirera son énergie de la fusion de l'hydrogène pendant dix milliards d'années. Au cours de cette période, que l'on nomme séquence principale de l'étoile, sa luminosité et sa température resteront à peu près constantes.

La datation d'une étoile – ou plutôt d'une population d'étoiles – repose sur le fait que la durée de la séquence principale varie d'une étoile à l'autre. Les étoiles plus massives que le Soleil brûlent leur hydrogène beaucoup plus vite, si vite que, même avec une quantité initiale de combustible largement supérieure, elles épuisent leurs réserves plus rapidement. Cette tendance peut être déduite des lois physiques qui gouvernent la structure d'une étoile : la loi de l'équilibre hydrostatique (qui traduit l'équilibre entre la force de gravitation et la pression du gaz), la loi des gaz parfaits (qui relie la pression, la température et la densité) et la loi du transport radiatif de la chaleur (qui détermine le gradient de température nécessaire pour que l'étoile libère de l'énergie vers l'extérieur au même rythme qu'elle en produit dans son cœur). On en déduit que la luminosité d'une étoile est proportionnelle à sa masse à la puissance quatre. Par ailleurs, la quantité d'hydrogène disponible est, quant à elle, directement proportionnelle à la masse. Par conséquent, la durée de vie d'une étoile sur la séquence principale est approximativement proportionnelle à l'inverse du cube de sa masse. Une étoile 10 fois plus massive que le Soleil est 10 000 fois plus brillante, mais vit 1 000 fois moins longtemps, soit dix millions d'années environ. Les étoiles massives brûlent la chandelle par les deux bouts : elles brillent beaucoup, mais au prix d'un terrible gaspillage et d'une vie très courte.

Une étoile qui quitte la séquence principale est facile à reconnaître. Son

cœur se contracte et s'échauffe de sorte qu'il continue à produire des réactions nucléaires (par exemple en fusionnant les noyaux d'hélium). Les couches supérieures de l'étoile sont repoussées vers l'extérieur et l'astre gonfle comme un ballon de baudruche. Chaque unité de surface de l'étoile reçoit moins d'énergie en provenance du cœur et le disque stellaire rougeoie, au lieu d'être chauffé à blanc. L'étoile est devenue une géante rouge, un stade caractérisé par une plus grande luminosité, mais aussi par une température de surface inférieure. Cette évolution est facile à observer lorsqu'on classe les étoiles en fonction de leur couleur (qui dépend directement de la température de surface) et de leur éclat (qui dépend de l'énergie lumineuse émise totale). Un tel diagramme, dit de Hertzsprung-Russell, rassemble pratiquement toutes les données disponibles pour les astronomes. Les étoiles de la séquence principale se répartissent sur un segment de droite oblique qui va des étoiles petites, froides (donc rouges) et peu brillantes aux étoiles massives, chaudes (donc bleues) et très lumineuses. Quand l'étoile devient une géante rouge, elle quitte la séquence principale et se retrouve dans un domaine du diagramme correspondant aux basses températures mais à de grandes valeurs de l'éclat lumineux (voir la figure 5).

La datation des plus anciennes étoiles

Bien que les astronomes puissent calculer la durée de vie totale d'une étoile, il est difficile de savoir combien de temps elle a déjà vécu. Une étoile de la séquence principale est un modèle de stabilité et on ne sait pas lui attribuer un âge précis jusqu'à ce qu'elle commence à évoluer et trahisse ainsi son grand âge. Pour cette raison, les astronomes étudient généralement des populations entières d'étoiles dont ils peuvent supposer qu'elles sont nées à peu près au même moment. Dans un tel groupe, certaines étoiles – les plus massives – sont en train de quitter la séquence principale au moment où nous les observons, même si les autres ne portent encore aucun stigmate du passage du temps. On peut dater les étoiles qui quittent la séquence principale et attribuer leur âge au groupe tout entier.

Les plus anciennes étoiles semblent être localisées au sein de groupements stellaires nommés amas globulaires. Ce sont des concentrations stellaires com-

pactes et denses, renfermant de 100 000 à quelques millions d'étoiles au sein d'une sphère d'une centaine d'années-lumière de diamètre. Alors que 75 pour cent des étoiles de notre Galaxie (y compris le Soleil) se répartissent dans un grand disque aplati (la Voie lactée), les amas globulaires se trouvent dans un halo sphérique qui englobe tout le disque. D'autres grandes galaxies contiennent également des amas globulaires répartis de la même façon.

La localisation des amas nous renseigne assez bien sur leur âge. En effet, dans les années 1930, l'astronome d'origine allemande Walter Baade a montré que les étoiles de notre Galaxie se classent en deux catégories. La «population I» contient des étoiles brillantes et bleues qui, étant massives, ont une durée de vie courte et doivent être jeunes. On ne les trouve que dans le disque galactique. L'autre catégorie, la «population II», regroupe les étoiles du halo, qui sont en général moins brillantes et plus rouges. Aujourd'hui, nous connaissons l'origine de ces deux populations distinctes : le disque contient de nombreux nuages de gaz à partir desquels de nouvelles étoiles peuvent se former, ce qui explique qu'il renferme quantité de jeunes étoiles flamboyantes. À l'opposé, le halo de notre Galaxie manque de gaz, et peu d'étoiles nouvelles s'y forment.

En fait, les amas sont peut-être un reliquat des briques fondamentales qui ont contribué à la formation de notre Galaxie. Leurs étoiles contiennent peu d'éléments plus lourds que l'hélium. Ces éléments, que les astronomes nomment métaux (à la grande consternation des chimistes), constituent environ deux pour cent de la masse du Soleil, mais seulement 0,01 à 0,5 pour cent de la masse d'une étoile d'amas globulaire. Ils ne peuvent être créés que par les réactions thermonucléaires qui ont lieu dans le cœur des étoiles. La rareté de ces éléments dans les étoiles des amas globulaires indique qu'elles se sont formées peu après le Big Bang, à partir de matériaux qui n'avaient pas encore été «pollués» par les produits des générations successives d'étoiles.

Il semble que les étoiles d'un amas globulaire donné aient toutes le même âge. On constate cette homogénéité lorsque l'on place les étoiles d'un amas dans un diagramme de Hertzsprung-Russell. Dans la séquence principale, les étoiles de masse relativement faible et à longue durée de vie sont légion,



2. LA NÉBULEUSE NGC 3603 contient des étoiles à différents stades de leur évolution. Au centre, un amas de jeunes étoiles massives et bleues s'est formé il y a quelques millions d'années seulement (1). Elles émettent un intense rayonnement ultraviolet et un flux de particules qui éclairent leur matrice de gaz et de poussière et la repoussent. Des zones de plus forte densité (2) résistent mieux à cette érosion et forment des «piliers» de gaz qui pointent vers l'amas. Un zoom sur le sommet de structures semblables dans la nébuleuse de l'Aigle (2b) montre de petits ergots encore plus denses. Cette fragmentation du nuage en éléments de plus en plus concentrés est le prélude à la formation de globules de Bok (3), puis à leur effondrement en une masse sphérique protostellaire. Sur la

même image, on observe une protoétoile (4) qui ne survivra probablement pas au souffle intense de ses grandes sœurs. D'autres protoétoiles ont été photographiées dans la nébuleuse d'Orion (4b et 4c) : autour de l'étoile en train de briller de ses premiers feux, on observe un disque de poussière qui formera vraisemblablement un système de planètes. Arrivée à la fin de sa vie, une étoile massive devenue géante est prise de violents «hoquets» qui éjectent le gaz de ses couches supérieures (5 et 6). Elle explosera violemment en supernova et restituera dans l'espace la matière qu'elle aura transmuté tout au long de sa vie. L'image en médaillon (5b) montre les restes d'un tel cataclysme observé en 1987 dans le Grand nuage de Magellan.

mais les étoiles les plus massives ont toutes disparu : elles ont évolué en géantes rouges, puis sont mortes. Seules subsistent, sous forme de géantes rouges, celles qui sont en train de quitter la séquence principale à la date où nous observons. Ainsi, les étoiles de l'amas se répartissent sur une ligne en forme de coude : la séquence principale se termine de façon abrupte, là où la branche des géantes rouges la rejoint (voir la figure 5). Cette coupure de la séquence principale confirme que les étoiles de l'amas se sont toutes formées à la même période.

Dès lors, la détermination de l'âge des amas globulaires devrait être un exercice relativement simple. Les astronomes établissent un diagramme de Hertzsprung-Russell pour un large échantillon d'étoiles de l'amas. Le diagramme révèle les étoiles qui viennent d'épuiser leur réserve d'hydrogène. On déduit de la luminosité et de la température de surface de ces étoiles une masse et, par conséquent, un âge. Dans la pratique, trois facteurs compliquent la tâche. La composition chimique exacte des étoiles modifie leur structure et leur évolution. Par ailleurs, la méthode dépend beaucoup de la fiabilité des modèles théoriques qui décrivent le

fonctionnement des étoiles. Pour finir, il est difficile de connaître la luminosité réelle d'une étoile (sa luminosité intrinsèque), car nous n'avons accès qu'à son éclat apparent vu de la Terre.

De l'influence des «métaux» sur l'âge des étoiles

Bien que les métaux ne constituent qu'une toute petite fraction de la masse d'une étoile, ils agissent sur sa structure. Ces éléments contribuent à la masse de l'étoile, mais ne subissent pas de fusion. Ils réduisent l'efficacité de la chaudière nucléaire, de sorte que le cœur de l'étoile doit être plus chaud pour maintenir l'équilibre. De plus, les métaux absorbent la lumière et entravent l'évacuation de l'énergie stellaire dans l'espace. Sous l'effet de cette absorption, l'étoile enfle ; le même flux d'énergie est réparti sur une surface plus grande, et la température de surface décroît. En conséquence, une étoile pauvre en métaux est plus brillante qu'une étoile de même masse riche en métaux, et sa température de surface est supérieure. Quand les astronomes surestiment le contenu en métaux d'une étoile, ils surestiment sa masse et, par conséquent, sous-estiment son âge.

Pour établir la composition d'une étoile, les astronomes analysent son spectre. Le spectre visible d'une étoile, obtenu en décomposant la lumière que nous en recevons, est continu mais strié de raies sombres qui correspondent aux longueurs d'onde caractéristiques absorbées par les différents éléments chimiques présents dans les couches externes de l'astre. Depuis une vingtaine d'années, grâce à la construction des grands télescopes et à l'introduction de détecteurs électroniques très sensibles, les astronomes obtiennent des spectres dont la résolution réduit notablement les erreurs de mesure (elles sont divisées par trois). À l'aide du télescope Keck de l'Observatoire d'Hawaii, Judith Cohen, de l'Institut californien de technologie, Raffaele Gratton, de l'Observatoire astronomique de Padoue, et leurs collègues ont récemment déterminé l'abondance des métaux dans les amas globulaires NGC 6528 et NGC 6553 avec une précision inégalée.

Ces compositions chimiques étant connues, reste la deuxième difficulté : les modèles théoriques ne sont que des approximations de la situation réelle au sein des étoiles. L'étude approfondie du Soleil a récemment révélé les limites de ces modèles. Jørgen Christensen-Dalsgaard, de l'Université d'Århus au Danemark, David Guenther, de l'Université Saint Mary, en Nouvelle-Écosse, et leurs collègues ont, par exemple, précisé notre connaissance de l'intérieur du Soleil en étudiant comment les ondes sismiques – analogues à celles qui parcourent la Terre – se propagent à l'intérieur du Soleil. L'étude de la propagation de ces ondes nous renseigne sur les variations de pression et de densité dans le Soleil et indiquent la présence de courants de convection ou de zones turbulentes dans le plasma solaire. Leur modèle fait apparaître que l'hélium doit



R. Rich, K. et J. Neill, W. Freedman et NASA



D. Figer et NASA

3. L'AMAS GLOBULAIRE G1 est un groupement gigantesque d'étoiles (a) situé dans le halo de la galaxie d'Andromède (une galaxie géante semblable à la nôtre). L'amas des quintuplets (b), situé près du centre de notre Galaxie, est d'un genre très différent. Il s'agit d'un amas ouvert, un groupement très récent d'étoiles peu nombreuses. Il n'est pas stable, et les astres qui le composent dérivent dans l'espace et s'éloignent les uns des autres. Cependant, dans les deux cas, les étoiles regroupées en amas sont nées au même moment. On remarque que les étoiles ont des couleurs différentes correspondant à des températures de surface qui peuvent varier de quelques dizaines de milliers de degrés (en bleu) à environ 4 000 degrés (en rouge).