

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 enflé ; 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).

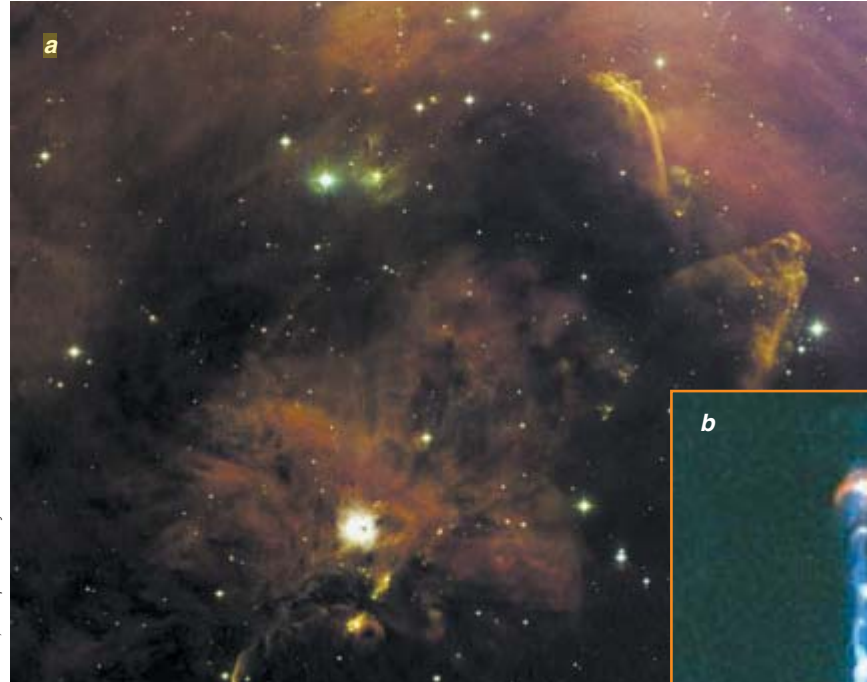
s'enfoncer lentement vers le cœur de notre étoile et y déloger l'hydrogène, phénomène qui réduit la quantité de carburant disponible et diminue l'espérance de vie du Soleil. Par ailleurs, nous avons précisé d'autres mécanismes, par exemple les échanges de chaleur par convection et les réactions du gaz solaire aux changements de température et de pression. Tous ces perfectionnements observationnels et théoriques ont eu pour effet de réduire de 14 pour cent les âges estimés des amas globulaires. Doit-on s'attendre à de nouvelles surprises ? Il est difficile de le dire. Les modèles stellaires ont été améliorés en les comparant au Soleil – la seule étoile que nous puissions étudier en détail – et ils le décrivent maintenant de façon très satisfaisante.

L'âge des incertitudes

La détermination de la luminosité absolue des étoiles reste la principale difficulté, car l'éclat apparent d'une étoile dépend à la fois de sa luminosité intrinsèque et de la distance qui nous en sépare et que nous savons mal évaluer. La voûte céleste semble sans profondeur et pour accéder à la troisième dimension, les astronomes doivent faire appel à diverses techniques, chacune adaptée à une échelle de distances différente.

Pour les objets assez proches, on recourt à la méthode dite de la parallaxe. La parallaxe désigne la modification apparente de position d'un objet lorsque notre point d'observation change. Vous pouvez constater ce phénomène en regardant votre index, bras tendu devant vous, avec un œil, puis avec l'autre : votre doigt semble se déplacer devant les objets situés à l'arrière-plan. Si vous rapprochez votre doigt de votre nez, vous remarquez que le changement apparent de position, la parallaxe, augmente. En vertu des règles trigonométriques, la parallaxe d'un objet – l'angle sous lequel on voit son déplacement apparent – est inversement proportionnelle à sa distance.

Pour mesurer la distance des étoiles, les astronomes cherchent à détecter leur parallaxe, c'est-à-dire leur déplacement apparent à mesure que la Terre tourne autour du Soleil en une année : les étoiles proches semblent se déplacer par rapport aux étoiles lointaines. Étant donné que le diamètre de l'orbite terrestre mesure 150 millions de kilomètres environ, une étoile qui se décale sur le ciel d'une seconde d'arc en six mois doit



4. LA NAISSANCE DES ÉTOILES est un phénomène violent. Le nuage interstellaire géant Orion A (a) est tout entier éclairé par les jeunes étoiles qui sont nées en son sein. Elles éjectent des jets de matière (b) et provoquent des ondes de choc qui déstabilisent le gaz environnant, dont certaines zones vont s'effondrer sous leur propre poids et donner naissance à de nouvelles étoiles. De ce fait, les naissances d'étoiles se propagent dans le milieu interstellaire à la manière d'une réaction en chaîne. Ainsi, les étoiles ont tendance à naître en groupes, ce qui explique que les astres qui constituent les amas ont tous le même âge.

être située à 3,26 années-lumière, ou, par définition, à un parsec. Dans la pratique, les télescopes au sol ne peuvent pas discerner de parallaxe inférieure à un centième de seconde d'arc, ce qui correspond à une étoile située à 100 parsecs. En fait, si l'on exige une précision meilleure que dix pour cent, les télescopes au sol sont incapables de déterminer la distance des étoiles au-delà de dix parsecs.

Malheureusement, à l'échelle galactique, une distance de dix parsecs est infime. De plus, les erreurs augmentent avec la distance. Les télescopes fonctionnant à leur limite de résolution surestiment les petites parallaxes et, par conséquent, sous-évaluent les distances. Afin de donner une base plus solide au calcul des distances cosmiques, l'Agence spatiale européenne a lancé, en 1989, le satellite *Hipparcos*. Sa mission consistait à établir une carte tridimensionnelle précise des étoiles situées à quelques centaines de parsecs. Doté d'une résolution d'un millième de seconde d'arc, il avait accès à des étoiles dix fois plus lointaines que les observateurs au sol. Bien sûr, cela reste la banlieue du Soleil et c'est insuffisant pour mesurer précisément la distance qui nous sépare des étoiles dans le plus proche amas globulaire (situé à 2 000 parsecs environ). Toutefois, *Hipparcos* nous a permis de déterminer précisément la distance d'étoiles voisines,

pauvres en métaux, assez semblables à celles présentes dans les amas globulaires. De ce fait, indirectement, les astronomes ont déterminé avec une assez bonne précision, la distance des amas globulaires en supposant que leurs étoiles ont la même luminosité intrinsèque que les étoiles proches de même composition chimique et de même couleur (c'est-à-dire de même température de surface).

Plus jeunes qu'on ne le pensait

On en déduisit que les amas globulaires sont plus éloignés qu'on ne le pensait d'au moins dix pour cent. Par conséquent, ils sont plus lumineux que prévu, et donc plus jeunes. Toutefois, ces nouvelles estimations ne font pas l'unanimité ; les modèles stellaires ne sont peut-être pas totalement fiables et notre estimation indirecte de la distance des amas globulaires est peut-être erronée.

Les astronomes ont cherché à confirmer ces estimations à l'aide de mesures indépendantes. Une des méthodes employées consiste à examiner le mouvement d'un grand nombre d'étoiles dans un amas globulaire. Le mouvement de chaque étoile a deux composantes : la vitesse radiale (le long de la ligne de visée)