

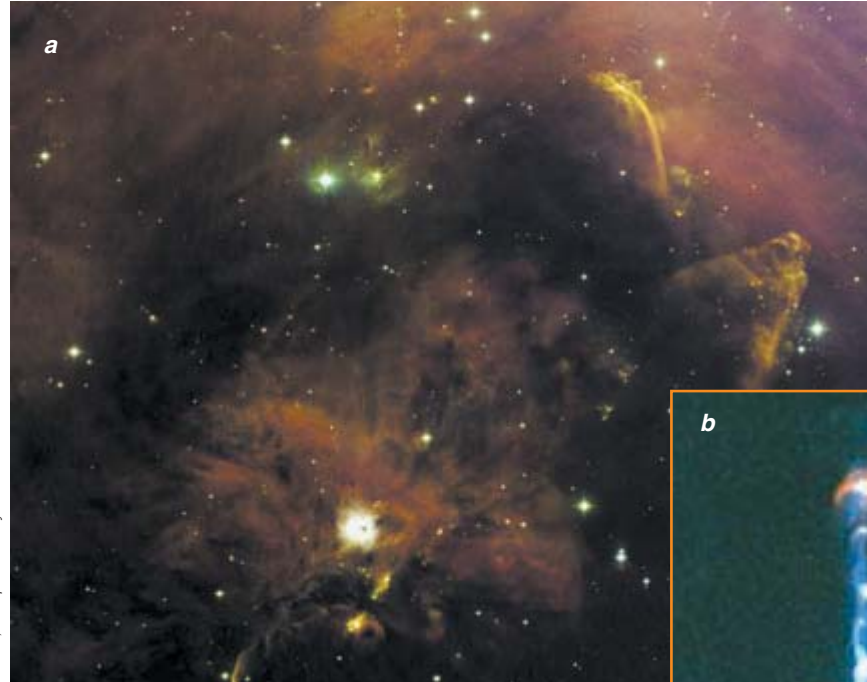
s'enfoncer lentement vers le cœur de notre étoile et y déloger l'hydrogène, phénomène qui réduit la quantité de carburant disponible et diminue l'espérance de vie du Soleil. Par ailleurs, nous avons précisé d'autres mécanismes, par exemple les échanges de chaleur par convection et les réactions du gaz 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)

La datation radioactive des étoiles

Pour estimer l'âge d'objets anciens de la période historique et préhistorique, on utilise souvent la datation radioactive. On se sert de l'isotope radioactif du carbone, le carbone 14, qui a une demi-vie de 5 570 ans. Cela signifie qu'au bout de ce laps de temps, la moitié des atomes de carbone 14 initialement présents dans un échantillon se seront désintégrés. Connaissant le rapport initial des abondances en carbone 12 (le carbone ordinaire, stable) et en carbone 14 dans un échantillon, on peut, en mesurant ce rapport aujourd'hui, en déduire son âge. À l'échelle de l'âge de l'Univers, on ne peut utiliser que des éléments ayant une demi-vie de plusieurs milliards d'années.

Les éléments chimiques présents dans les étoiles ont essentiellement trois origines. L'hydrogène et l'hélium, les plus abondants, sont «primordiaux» : ils se sont formés au cours des trois premières minutes de l'Univers. La plupart des éléments plus lourds, de l'hélium au fer, sont formés par fusion thermonucléaire dans le cœur des étoiles. Lorsque les étoiles les plus massives explosent en supernovae, elles restituent au milieu interstellaire ces éléments chimiques plus lourds que l'hélium qui entreront dans la composition de nouvelles étoiles. L'énergie disponible au cours de cette explosion permet de synthétiser une troisième famille d'éléments formée par exposition des noyaux de fer à un flux intense de neutrons. Les atomes de fer (et ceux de masse atomique proche) absorbent une partie des neutrons incidents, et le nombre de nucléons contenus dans leur noyau augmente. Ceci produit la suite des éléments chimiques jusqu'aux éléments les plus lourds, dont le thorium 232 et l'uranium 235 et 238, tous trois radioactifs.

Les premières tentatives de datation radioactive des étoiles reposaient sur la mesure du rapport des abondances en thorium 232 (radioactif) et en europium 151 (stable), deux éléments produits par capture de neutrons. Toutefois, la demi-vie du thorium 232 est d'environ 14 milliards d'années – plus longue que la vie des étoiles que l'on veut dater – et la précision de la méthode est mauvaise. Par ailleurs, Marcel Arnould et ses collègues

de l'Université libre de Bruxelles ont souligné que cette méthode repose sur une hypothèse fragile : on postule que le rapport initial des abondances en thorium et en europium est toujours le même d'une étoile à l'autre. Or, le nombre de nucléons contenus dans le thorium (232) est très supérieur à celui des nucléons contenus dans l'europium (151). Un flux de neutrons suffisant pour produire du thorium produira de l'europium en abondance, tandis qu'un flux de neutrons plus faible pourrait produire de l'europium en quantité notable, sans être assez intense pour produire du thorium. Ainsi, le rapport initial des abondances en thorium et en europium dépend de l'intensité du bombardement de neutrons qu'a subi la matière de l'étoile. Vraisemblablement, il diffère d'une étoile à l'autre.

On s'affranchit de ces difficultés en abandonnant l'europium pour l'uranium 238, dont la demi-vie est égale à 4,47 milliards d'années (deux à trois fois moins que l'âge des plus vieilles étoiles), et dont le nombre de nucléons est presque le même que celui du thorium. Malheureusement, on détecte difficilement l'uranium dans les étoiles, car sa raie spectrale la plus intense est perdue parmi les raies du fer, un élément abondant chez les étoiles de composition chimique semblable à celle du Soleil. Dans les étoiles les plus anciennes, les éléments chimiques tels que le fer sont rares, mais la raie de l'uranium est très faible. Pourtant, nous avons récemment réussi à détecter l'uranium dans l'étoile CS 31082-001, une géante de l'hémisphère Sud. Cette étoile contient environ 1 000 fois moins d'éléments courants (jusqu'au fer) que le Soleil, mais elle est riche en éléments très lourds formés par capture de neutrons, parmi lesquels le thorium et l'uranium. Par ailleurs, le spectre de CS 31082-001 que nous avons obtenu bénéficiait de l'excellente résolution conférée par le très grand télescope (VLT) de l'Observatoire européen austral (ESO).

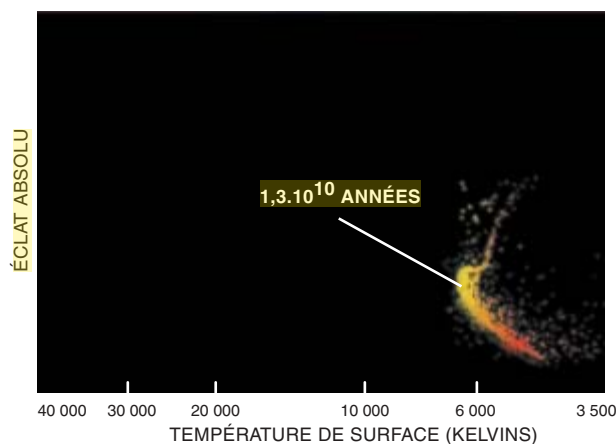
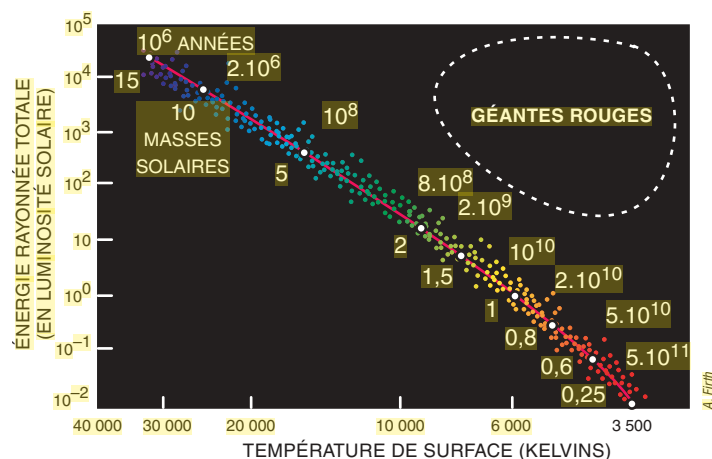
Nous avons constaté que les éléments très lourds, formés par capture de neutrons et proches de l'uranium (l'osmium et l'iridium, par exemple), sont présents avec des abondances qui représentent environ 12 pour cent des abondances solaires. Seules exceptions, le thorium et l'uranium sont encore plus rares puisqu'ils se désintègrent au cours du temps. En supposant que le thorium et l'uranium étaient initialement présents avec une abondance égale à 0,12 fois celle qui est la leur dans le Soleil, nous avons estimé qu'il se serait écoulé 12,5 milliards d'années (plus ou moins trois milliards) depuis la naissance de CS 31082-001. Par ailleurs, l'estimation de l'âge de cette étoile d'après les abondances en thorium et en europium est inacceptable (elle est proche de zéro !). Ceci confirme que le rapport initial thorium-europium n'est pas transposable d'une étoile à l'autre.

Nous connaissons encore mal le rapport actuel uranium-thorium dans CS 31082-001 et, surtout, le rapport initial au moment de la production de ces deux éléments. Il nous faudra encore améliorer ces deux valeurs pour réduire l'imprécision encore élevée sur la datation.

Roger CAYREL, Observatoire de Paris-Meudon



European Southern Observatory



5. LE DIAGRAMME DE HERTZSPRUNG-RUSSELL, le plus important des diagrammes utilisés en astronomie, montre que la production d'énergie et la température des étoiles les placent toutes sur une portion de droite qui constitue la «séquence principale», où elles restent cantonnées tant que l'hydrogène est le combustible de base de leurs réactions thermonucléaires (à gauche). La température de surface d'une étoile est estimée grâce à la couleur correspondant à l'émission maximale d'énergie (du rouge pour les étoiles les plus froides au bleu pour les plus chaudes, en passant par le jaune des étoiles moyennes comme le Soleil). Quand l'étoile est proche de sa fin, elle quitte la séquence principale et bifurque vers la zone des géantes rouges (des

étoiles de basse température de surface, mais d'éclat important). Plus une étoile est massive, plus sa température de surface est importante et plus son séjour dans la séquence principale est court. Les astronomes ont reporté les éclats et les couleurs des étoiles brillantes de l'amas NGC 6652 (à droite), sur un digramme Hertzsprung-Russell. Ces étoiles ont toutes le même âge : 13 milliards d'années. Celles dont la durée de vie est inférieure à cet âge ont toutes disparu et sont donc absentes du diagramme. Les autres sont encore sur la séquence principale. Les étoiles qui épuisent leur hydrogène en 13 milliards d'années exactement sont actuellement en train de migrer vers la région des géantes rouges, trahissant ainsi l'âge de l'amas.

et la vitesse angulaire (sur la voûte céleste). Les astronomes mesurent chaque composante par des moyens différents. La vitesse radiale est obtenue par effet Doppler (lorsqu'une étoile s'éloigne de nous, la lumière qu'elle nous envoie est décalée vers les grandes longueurs d'onde d'une quantité proportionnelle à sa vitesse). La vitesse angulaire est estimée d'après une série de photographies prises sur plusieurs années. Pour une étoile, ces deux vitesses sont indépendantes. Pour un amas globulaire, où des milliers d'étoiles se déplacent au hasard, la vitesse radiale moyenne devrait être égale à la vitesse angulaire moyenne. Or, la mesure des vitesses radiales par effet Doppler est indépendante de la distance des étoiles, alors que le déplacement angulaire est d'autant plus faible que la distance est grande. De cette façon, les astronomes ont estimé l'éloignement des amas globulaires.

On déduit de cette méthode qu'*Hipparcos* a surestimé les distances qui nous séparent des amas globulaires, même s'ils semblent effectivement être plus lointains qu'on ne le pensait auparavant. Aujourd'hui, on estime que les amas les plus vieux ont environ 13 milliards d'années (à 1,5 milliard d'années près). Cette datation révisée est en accord avec la nouvelle estimation de l'âge de l'Univers fondée sur les dernières mesures de sa vitesse d'expansion

(environ 15 milliards d'années). Pour la première fois depuis la naissance de la cosmologie moderne, il y a un demi-siècle, les cosmologistes et les spécialistes de la physique stellaire sont parvenus à se mettre d'accord.

La datation des étoiles dans les amas globulaire n'est pas le seul moyen d'estimer l'âge de notre Galaxie, et d'autres méthodes donnent des résultats très similaires. Il y a quelques mois, Roger Cayrel et ses collègues de l'Observatoire de Paris ont appliqué aux étoiles une technique utilisée de longue date par les archéologues et par les géologues : la datation par des isotopes radioactifs. Ils ont d'abord effectué les premières mesures précises de la quantité d'uranium contenue dans une autre étoile que le Soleil : CS 31082-001, une vieille étoile de population II. Connaissant la vitesse à laquelle l'uranium disparaît et à l'aide d'hypothèses sur la quantité d'uranium qui était présente dans l'étoile lors de sa formation, R. Cayrel et ses collègues ont estimé

qu'il s'était depuis écoulé 12,5 milliards d'années, à trois milliards d'années près (voir l'encadré ci-contre).

À terme, les isotopes radioactifs pourraient supplanter les amas globulaires comme outils de datation des étoiles. Auparavant, les astronomes s'attachèrent à confirmer les estimations fondées sur l'étude des amas globulaires. De nouveaux télescopes au sol, tel le très grand télescope VLT de l'Observatoire européen austral, promettent de réduire encore l'incertitude sur la composition chimique des étoiles contenues dans les amas. De nouveaux observatoires spatiaux, comme le satellite *Gaia* de l'Agence spatiale européenne ou le satellite de la mission spatiale d'interférométrie SIM de la NASA, devraient, avec une résolution 250 fois supérieure à celle d'*Hipparcos*, déterminer directement la distance des amas les plus proches, supprimant les intermédiaires. Ils apporteront enfin une réponse définitive à une question qui tracasse les astronomes depuis plusieurs décennies.

Brian CHABOYER est professeur au département de physique et d'astronomie de l'Université Dartmouth, et participe à la mission d'interférométrie spatiale SIM de la NASA.

James KALER et W. FREEMAN, *Stars*, 1998.

Brian CHABOYER, *Globular Cluster Distance Determinations*, in *Post-Hipparcos Cosmic Candles*, sous la direction d'André

Heck et Filippina Caputa, Kluwer, 1999.

Mickael PERRYMAN, *Hipparcos : The Stars in Tree Dimensions*, in *Sky and Telescope*, vol. 97, n° 6, juin 1999.

Yveline LEBRETON, *Stellar Structure and Evolution : Deductions from Hipparcos*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 38, pp. 35-77, 2000.