

L'âge des plus anciennes étoiles

BRIAN CHABOYER

Les plus anciennes étoiles de la galaxie semblaient plus âgées que l'Univers. Ce paradoxe est enfin levé grâce aux données fournies par le satellite Hipparcos et aux progrès de la physique stellaire.

Il y a quelques années, les débats sur le «paradoxe de l'âge de l'Univers» agitaient la communauté des astrophysiciens. Les mesures de la vitesse d'expansion de l'Univers semblaient indiquer qu'il ne s'était écoulé que 14 milliards d'années depuis le Big Bang, alors que certaines étoiles étaient bien plus âgées. À l'époque, la plupart des astronomes croyaient davantage aux méthodes de datations des étoiles qu'aux théories cosmologiques. Les cosmologistes étaient donc sommés de trouver la solution au problème.

Comme dans d'autres domaines, une question qui ne trouvait pas de réponse compatible avec les théories en usage nous a mis sur la piste d'une découverte fondamentale. Les débats sur l'âge de la Terre ont aidé Charles Darwin à formuler sa théorie de l'évolution par sélection naturelle ; les désaccords sur l'âge du Soleil n'ont pu être résolus qu'avec la découverte de la physique nucléaire, et les physiciens comme Albert Einstein n'abandonneront l'idée d'un Univers statique et éternel, pourtant remise en cause par la relativité générale, que lorsqu'Edwin Hubble observa que les galaxies s'éloignent de nous.

De la même façon, on peut dire que la crise ouverte par le paradoxe de l'âge de l'Univers fut le premier acte de la prise de conscience que l'Univers est dominé non pas par la matière ordinaire, mais par un type d'énergie dite sombre dont les cosmologistes ignorent presque tout, si ce n'est qu'elle semble accélérer l'expansion de l'Univers. Cette accélération cosmique a pour conséquence de reculer la date

calculée de l'origine de l'Univers et promet de lever le paradoxe.

La vitesse d'expansion de l'Univers faisait l'objet d'un débat souvent virulent depuis un demi-siècle (les estimations effectuées par différentes équipes variaient du simple au double!). En revanche, l'estimation de l'âge des plus anciennes étoiles de la Galaxie, réalisée notamment par Pierre Demarque de l'Université Yale, était, elle, très fiable. Depuis le milieu des années 1960, les modèles théoriques prédisaient que les étoiles les plus vieilles étaient âgées de 15 milliards d'années, et cette estimation était acceptée par l'ensemble des spécialistes de physique stellaire. Cette certitude a été ébranlée il y a cinq ans, quand les données fournies par le satellite de cartographie céleste en trois dimensions, *Hipparcos*, associées aux nouveaux modèles de l'évolution des étoiles, ont forcé les astronomes à revoir à la baisse l'âge des étoiles les plus anciennes : elles n'ont «que» 13 milliards d'années!

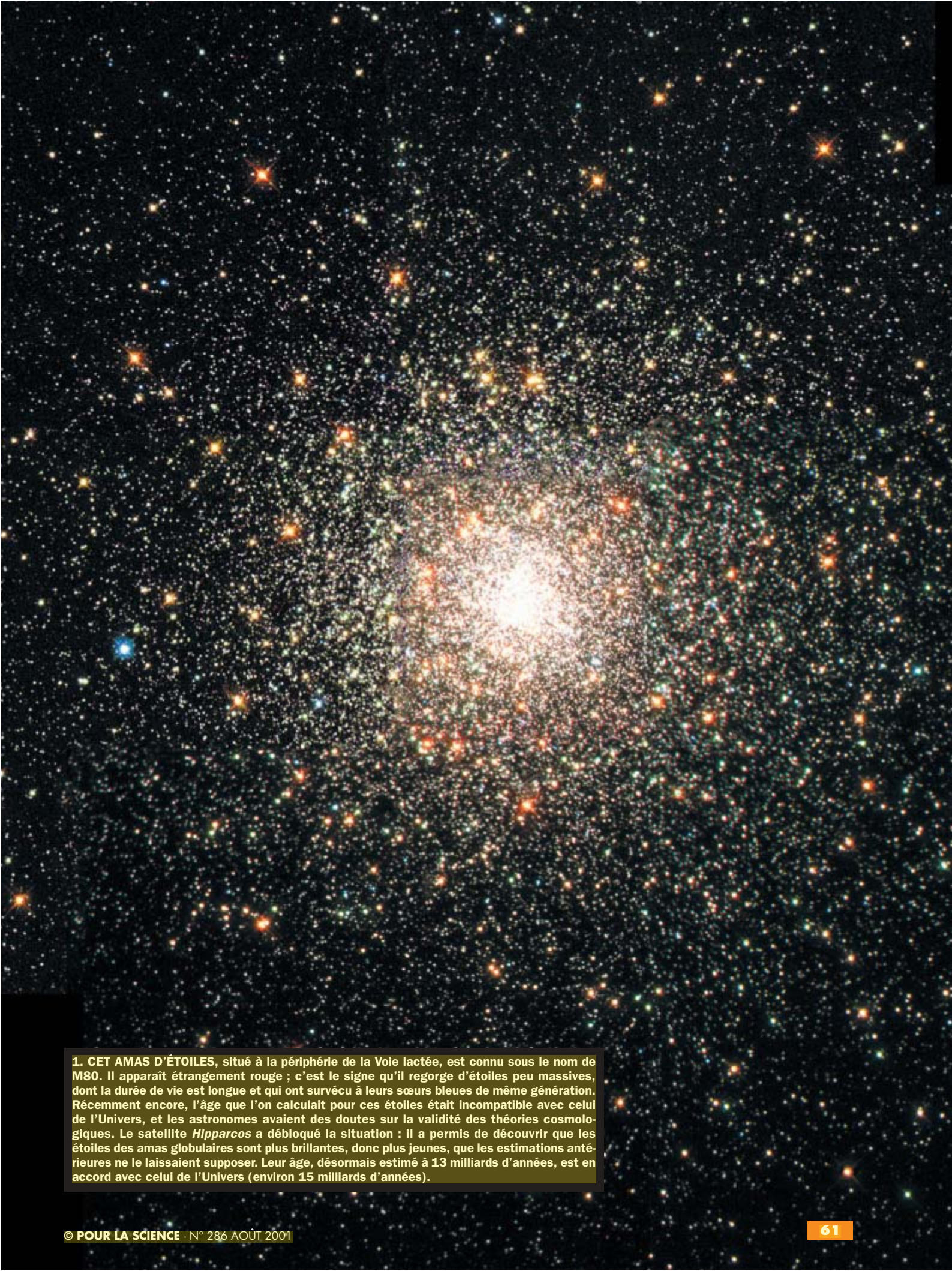
Consommation stellaire

Comment peut-on estimer l'âge d'une étoile? Imaginez que le compteur kilométrique de votre voiture ne fonctionne plus. Comment connaître la distance qu'elle a parcourue? Le problème est facile à résoudre si vous connaissez la capacité du réservoir et la consommation au kilomètre de votre véhicule : il suffit de diviser la quantité de carburant utilisée par la consommation. La méthode employée dans le cas des étoiles est analogue. La taille du réservoir est remplacée par la masse de l'étoile, et la

consommation au kilomètre par le rendement des réactions nucléaires.

Les étoiles sont des boules de plasma chaud en équilibre. Elles tendent à s'effondrer sur elles-mêmes sous l'effet de leur propre poids, mais l'énergie thermique interne et la pression exercée par la lumière qu'elles rayonnent les en empêchent. Comme les étoiles déversent de l'énergie dans l'espace, elles devraient perdre leur feu intérieur et se contracter rapidement en vieillissant (dans ce cas, le Soleil, par exemple, n'aurait vécu que quelques millions d'années en tout). Heureusement, des réactions thermonucléaires qui ont lieu dans leur cœur fournissent l'énergie nécessaire pour maintenir cet équilibre pendant très longtemps, parfois quelques milliards d'années.

Pendant l'essentiel de leur vie, les étoiles sont alimentées par la fusion thermonucléaire de l'hydrogène en hélium. Cette réaction ne peut avoir lieu qu'aux très hautes températures qui règnent dans le cœur des étoiles (de quelques millions à quelques centaines de millions de degrés). Dans ces conditions, la vitesse moyenne d'agitation des noyaux atomiques est suffisante pour leur permettre de se rencontrer malgré la répulsion électrostatique qu'ils exercent les uns sur les autres. Le bilan de la réaction est le suivant : quatre noyaux d'hydrogène (constitués chacun d'un unique proton) donnent un noyau d'hélium (comportant deux protons et deux neutrons). Quatre protons pèsent 0,7 pour cent de plus qu'un noyau d'hélium ; au cours de la fusion, la fraction de masse manquante a été convertie en énergie selon l'équation d'Einstein $E = mc^2$. Le



1. CET AMAS D'ÉTOILES, situé à la périphérie de la Voie lactée, est connu sous le nom de M80. Il apparaît étrangement rouge ; c'est le signe qu'il regorge d'étoiles peu massives, dont la durée de vie est longue et qui ont survécu à leurs sœurs bleues de même génération. Récemment encore, l'âge que l'on calculait pour ces étoiles était incompatible avec celui de l'Univers, et les astronomes avaient des doutes sur la validité des théories cosmologiques. Le satellite *Hipparcos* a débloqué la situation : il a permis de découvrir que les étoiles des amas globulaires sont plus brillantes, donc plus jeunes, que les estimations antérieures ne le laissaient supposer. Leur âge, désormais estimé à 13 milliards d'années, est en accord avec celui de l'Univers (environ 15 milliards d'années).

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,