

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 67 (2009)
Heft: 352

Artikel: Après le Big Bang : la toute première génération d'étoiles
Autor: Ekström, Sylvia
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-897284>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 31.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Après le Big Bang

La toute première génération d'étoiles

■ Par Sylvia Ekström, Observatoire Astronomique de l'Université de Genève

Imaginez un Univers sans étoiles... ce serait bien triste, n'est-ce pas ? Je suppose qu'à cette évocation, la majorité d'entre vous s'est représentée en rêveur mélancolique, assis sur un bout de caillou aride et contemplant un ciel d'encre. Eh bien ce serait encore plus triste que cela: sans étoiles, vous et moi serions réduits à l'état de petits nuages de gaz diffus, sans même un caillou pour s'asseoir... Les étoiles ont formé le fer et la silice des roches sur lesquelles nous marchons, le calcium dans nos os, la plupart de l'oxygène dans l'air que nous respirons. Sans elles, l'Univers ne contiendrait rien. Mais reprenons l'histoire depuis le début.

Quelques infimes fractions de secondes après le Big Bang, l'Univers est une espèce de purée de particules fondamentales, qui s'expand à toute vitesse en se refroidissant. Après un dix-millième de secondes, la température est suffisamment descendue (il ne fait plus que mille milliards de degrés Kelvin !) pour que les quarks se confinent et forment les protons et les neutrons. Ceux-ci ne cessent d'interagir, se transformant les uns en les autres grâce aux interactions avec les neutrinos. Lorsque l'Univers est âgé d'une seconde environ, les neutrinos deviennent indépendants et partent vivre leur vie sans plus interagir avec la matière. Dès ce moment, les neu-

trons qui sont instables se désintègrent progressivement en protons. Lorsque l'Univers est âgé de trois minutes environ, la température a baissé à un milliard de degrés Kelvin. A cette température-là, la formation de noyaux de deutérium (un proton et un neutron) devient stable, ce qui préserve les neutrons restant.

C'est le début d'une phase cruciale pour l'histoire de l'Univers: la « nucléosynthèse cosmologique », soit la formation des premiers éléments chimiques. Le deutérium permet la production de l'hélium, dont une petite fraction donne à son tour naissance à un peu de lithium, puis de beryllium et de bore. La nature ren-

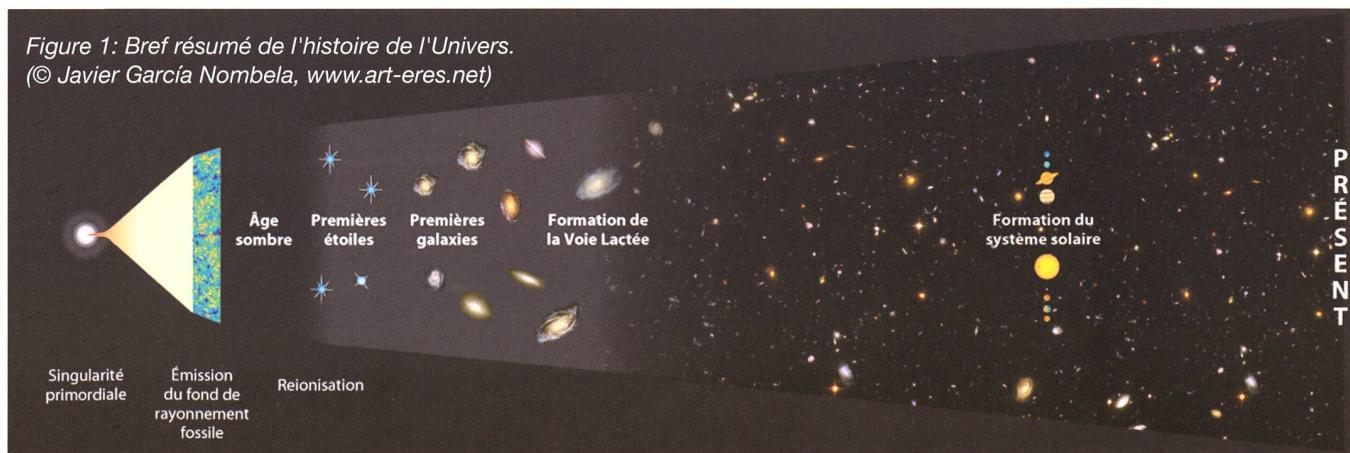
contre alors un obstacle de taille: il n'existe pas de noyau stable de masse atomique 5 ou 8. Pour franchir ce cap, il faut certaines conditions de température et de densité, or l'Univers continue de se refroidir et de se diluer. Après un gros quart d'heure, la température (300 millions de degrés Kelvin) est devenue tout à fait insuffisante. La nucléosynthèse cosmologique s'arrête donc avant que les éléments plus lourds que le bore (appelés métaux par les astronomes) n'aient pu être formé.

Les âges obscurs

Après cet épisode, l'Univers évolue sans aucun fait marquant pendant environ 400'000 ans. A ce moment-là, la température a tellement chuté (3'000 degrés Kelvin) que le gaz ionisé se recombine avec les électrons: l'Univers devient transparent. Les photons s'échappent alors librement, leur longueur d'onde s'abaisse progressivement, sortant du domaine visible (ce rayonnement fossile est aujourd'hui détecté dans les micro-ondes), et on entre dans ce qu'on appelle les âges obscurs.

L'Univers n'est alors constitué que de gaz neutre: d'hydrogène et d'hélium, avec des traces de lithium, beryllium et bore. La dilution et le refroidissement continuent inexorablement. Sans aucune autre intervention, l'Univers ne ressemblerait en rien à ce que nous connaissons, et comme décrit plus haut, n'y régneraient que des nuages de gaz diffus et de matière noire. Or un simple regard autour de nous peut nous assurer qu'il a dû se passer quelque chose, et que la nucléosynthèse a bien dû franchir le cap des masses atomiques 5 et 8 !

Figure 1: Bref résumé de l'histoire de l'Univers.
(© Javier García Nombela, www.art-eres.net)



En fait, lors de la recombinaison, d'infimes inhomogénéités existent, et la gravitation va progressivement les accentuer: les zones moins denses vont se diluer encore plus, mais les sur-densités vont donner naissance à des amas de plus en plus compactes. Après environ 200 millions d'années, les conditions au coeur de ces amas vont devenir propices à la formation d'étoiles.

Former des étoiles sans métaux

Pour que la formation d'étoiles puisse avoir lieu au sein de nuages moléculaires, il faut que le nuage atteigne une certaine masse critique (environ 50'000 fois la masse du Soleil) qui lui permet de commencer à s'effondrer. Mais l'effondrement ne se fait pas d'un bloc, sinon une seule étoile phénoménallement massive en naîtrait. En fait, la masse critique dépend du rapport entre la densité et la température du nuage. Plus le nuage est dense, plus la masse peut être petite; au contraire plus la température est élevée, plus la masse doit être grande pour que l'effondrement ait lieu. Dans l'Univers récent que nous pouvons observer autour de nous, les poussières et les métaux présents dans le nuage arrivent à évacuer la chaleur due à la compression progressive du gaz, et permettent ainsi au nuage de se fragmenter en sous-structures et de former une multitude d'étoiles à partir de cette quantité de gaz.

Or dans les nuages de gaz primordiaux, il n'y a ni poussière ni métaux. La seule molécule pouvant assurer le refroidissement, et donc la fragmentation du nuage, est la molécule H_2 , mais elle est trop symétrique pour être efficace. Les toutes premières étoiles qui se sont formées dans l'Univers devaient donc être extrêmement massives, de vrais monstres de plusieurs centaines de fois la masse du Soleil.

La vie des monstres

L'effondrement initial d'une étoile est interrompu lorsque son coeur devient si chaud que des réactions nucléaires peuvent y avoir lieu et que l'énergie ainsi dégagée arrive à contrecarrer la force gravitationnelle. Le premier stade de la vie d'une étoile est la phase de fusion de l'hydrogène, et cette fusion peut

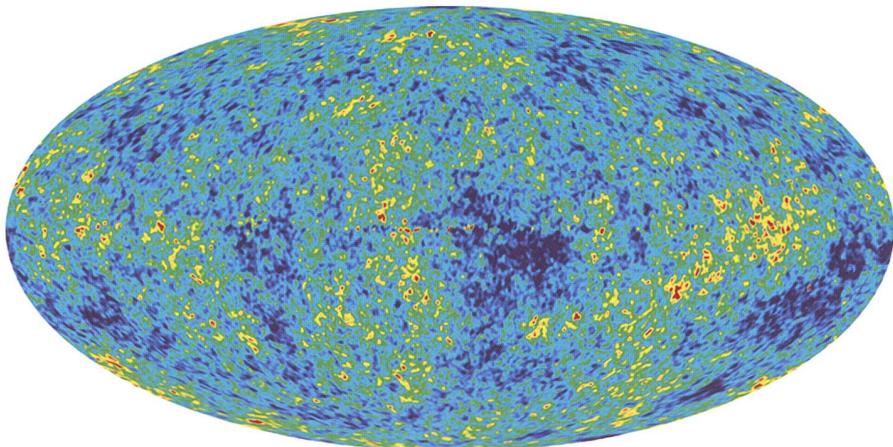


Figure 2: Fond de rayonnement fossile à 3 K. Les variations en température sont de l'ordre de seulement un dix-millième de degré. (© NASA / WMAP)

procéder de deux manières: soit par la fusion directe de protons (appelée « chaînes p-p »), soit par le biais de catalyseurs que sont le carbone, l'azote et l'oxygène (appelée « cycle CNO »). Les étoiles massives dans l'Univers récent doivent leur soutien à ce deuxième mécanisme, car il est très réactif en température.

Les étoiles primordiales, quant à elles, ne peuvent compter que sur les chaînes p-p, qui ralentissent l'effondrement mais ne parviennent pas à le stopper. Elles vont donc se contracter beaucoup plus longtemps que leurs homologues métalliques. Leur coeur atteint ainsi une température suffisante pour commencer de brûler un tout petit peu d'hélium,

formant enfin le carbone nécessaire pour brûler l'hydrogène par le cycle CNO et obtenir un soutien efficace. Comme l'enveloppe de ces étoiles est beaucoup plus transparente que celle d'étoiles qui contiennent des métaux, la radiation peut s'en échapper plus facilement, et elles restent très compactes et bleues.

Passé la phase de fusion de l'hydrogène, l'étoile est déjà assez chaude pour se mettre directement à consommer son hélium, sans grand réajustement de structure. Alors que les étoiles que nous connaissons passent par une phase de contraction rapide du coeur, avec un effet miroir d'expansion de leur enveloppe qui les fait devenir des géantes rouges au rayon distendu, les

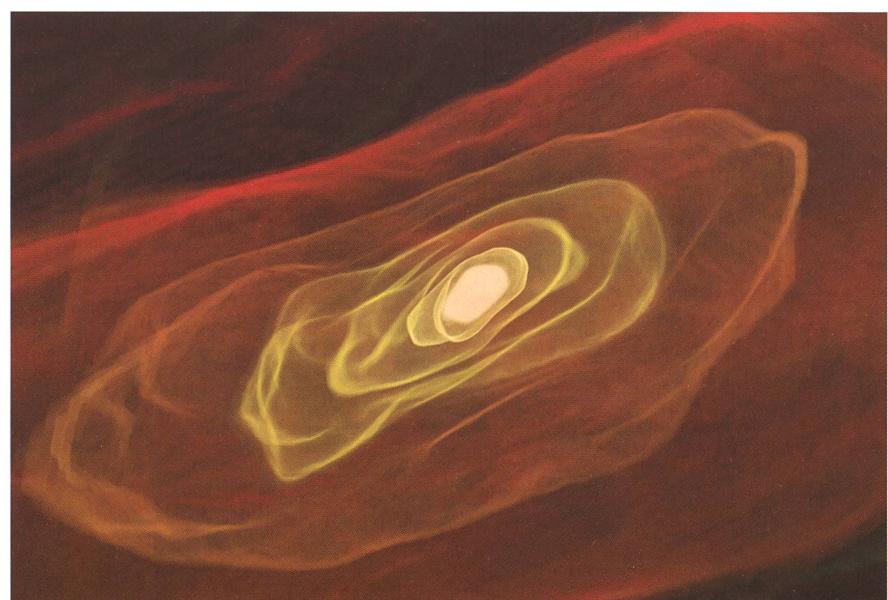


Figure 3: Représentation d'une étoile primordiale issue de simulations numériques. (© Ralf Kaehler & Tom Abel)

étoiles primordiales restent bleues et enchaînent tranquillement ces deux phases de fusion. Elles ne deviennent géantes rouges que très progressivement au cours de la fusion de l'hélium.

Par la suite, leur évolution ne diffère pas sensiblement de celle des étoiles massives telles que nous les connaissons. Durant la fusion de l'hélium elles vont produire du carbone et de l'oxygène, puis se mettre à fusionner le carbone, formant du néon, du sodium et du magnésium. L'oxygène est le prochain élément en matière de poids atomique, mais sa stabilité exceptionnelle le protège. C'est le néon qui fournit le prochain combustible, produisant oxygène et magnésium par sa photo-désintégration.

Une fin cataclysmique

Lorsque le tour de l'oxygène arrive enfin, les étoiles primordiales se distinguent à nouveau. Les plus massives d'entre elles peuvent subir ce que l'on nomme une instabilité par création de paires: les photons produits durant la fusion de l'oxygène par ces monstres énormes ont une énergie telle qu'ils peuvent se transformer en paires d'électrons-positrons. Cela soustrait des photons, et donc une source de pression pour l'étoile qui devient vulnérable à sa propre gravité et s'effondre, provoquant une supernova cataclysmique qui la détruit entièrement. Tous les éléments formés durant sa vie, ainsi que ceux formés lors de l'explosion, sont répandus dans le milieu environnant, enrichissant l'Univers en éléments lourds. La prochaine génération d'étoiles contiendra ainsi des traces de métaux, et la fragmentation efficace du nuage permettra la naissance d'étoiles de petites masses.

Les étoiles primordiales de moindre masse continuent l'évolution normale d'une étoile massive, produisant silicium, phosphore, soufre, argon et calcium lors de la fusion stable de l'oxygène, puis fer, cobalt et nickel lors de la fusion du silicium. En revanche, l'effondrement qui suit la formation d'un cœur de fer provoque la formation d'un trou noir, qui selon les cas peut avaler toute la matière de l'étoile. Celle-ci ne participe donc pas à l'enrichissement chimique de l'Univers. Cependant, dans la

zone qui a subi l'influence de leur fort rayonnement, la formation de la molécule HD est favorisée, molécule qui présente un pouvoir refroidissant bien plus élevé que la molécule H₂. La prochaine génération d'étoiles se forme sans métaux, mais avec une fragmentation plus importante qui permet la naissance d'étoiles de petites masses.

Mais où sont donc les étoiles primordiales ?

Elles sont disparues depuis longtemps, car les étoiles aussi massives qu'elles ne vivent que quelques millions d'années. Les télescopes même les plus performants ne parviennent pas encore à remonter aussi loin dans le temps. En revanche, ces étoiles ont laissé des traces dans la génération qui leur a directement succédé.

Curieusement, ce n'est pas dans les galaxies les plus lointaines que l'on cherche ces reliques des temps passés. Les étoiles les plus déficientes en métaux s'observent à « quelques pas » de chez nous, dans le halo de notre propre Galaxie. Ces étoiles sont rares, et difficiles à trouver. A l'heure actuelle, seules deux étoiles détiennent le record d'avoir un contenu en fer 100'000 fois plus petit que notre Soleil, qui pourtant ne contient que 2% d'éléments lourds. En étudiant leur composition chimique, les rapports d'abondances étranges qu'elles présentent à leur surface, on peut tenter de comprendre la vie et la mort de la toute première génération d'étoiles, celle qui a marqué le pas entre l'Univers de pur hydrogène et hélium du début des temps et l'Univers fascinant, riche et complexe dans lequel nous évoluons à présent.

Sylvia Ekström

Observatoire Astronomique de l'Université de Genève
51, chemin des Maillettes
CH-1290 Sauverny

Kollisionen in Galaxienhaufen

Aus der Kombination von Daten des Röntgenteleskops Chandra, des Weltraumteleskops Hubble und des Keck-Observatoriums gelang es Astronomen, eine gigantische Kollision zwischen vier Galaxienhaufen in 5,4 Milliarden Lichtjahren Entfernung zu entschlüsseln. Die Wissenschaftler konnten von MACSJ0717 aus den Rohdaten eine dreidimensionale Geometrie modellieren. Es zeigte sich, dass in den Haufen ein mehrere Millionen Lichtjahre langer Strom, bestehend aus Galaxien, Gas und dunkler Materie hineinragt, wo es zu einer Kollision nach der anderen zwischen Galaxien



Blick auf MACSJ0717.5+3745.
Bild: NASA / CXC / IfA / C. Ma et al. (Röntgendifferenz) / NASA / STScI / IfA / C. Ma et al. (optische Daten)

kommt. Auch die bei diesen Kollisionen freigesetzte Wärmeenergie sei bemerkenswert, wie die University of Hawaii verlauten lässt. Zwar ist das in MACJ01717 hineinragende Filament schon früher beobachtet worden, doch jetzt konnte das räumliche Modell die Beobachtungsdaten bestätigen. Es sei höchst interessant das Wachsen eines Galaxienhaufens zu studieren. Aus den Beobachtungen erhoffen sich die Astronomen von diesem Objekt eine ganze Menge darüber zu erfahren, wie sich gewisse Strukturen unseres Universums gebildet und im Laufe der Milliarden Jahre entwickelt haben könnten.