CIEL & ESPACE

LE MAGAZINE DE L'ASTRONOMIE

Février 2014

L'HYPOTHÈSE FOLLE D'UN COSMOLOGISTE DE HARVARD

LES PLANÈTES DU BIG BANG

ENQUÊTE

L'OBSERVATOIRE AUGER JOUE À QUITTE OU DOUBLE

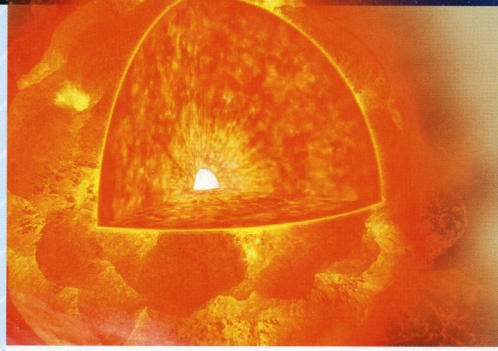
HISTOIRE

QUAND A EXPLOSÉ LA SUPERNOVA DE CASSIOPÉE ?

LE GUIDE D'OBSERVATION

TEST : UNE MONTURE TOUS AZIMUTS

PREMIERS PAS : UTILISER DES JUMELLES EN ASTRONOMIE



THÉMA

BÉTELGEUSE

UN MODÈLE DE SUPERGÉANTE ROUGE

CIEL & ESPACE Février

Lux : 5,60 € - Aut : 6,20 € - May : 7,30 € - Port Cont : 5,60 € - Spm : 6,60 € - Mar : 40 DH - Tun : 5000 Tnm - Zone CFA : 3900 F.CFA

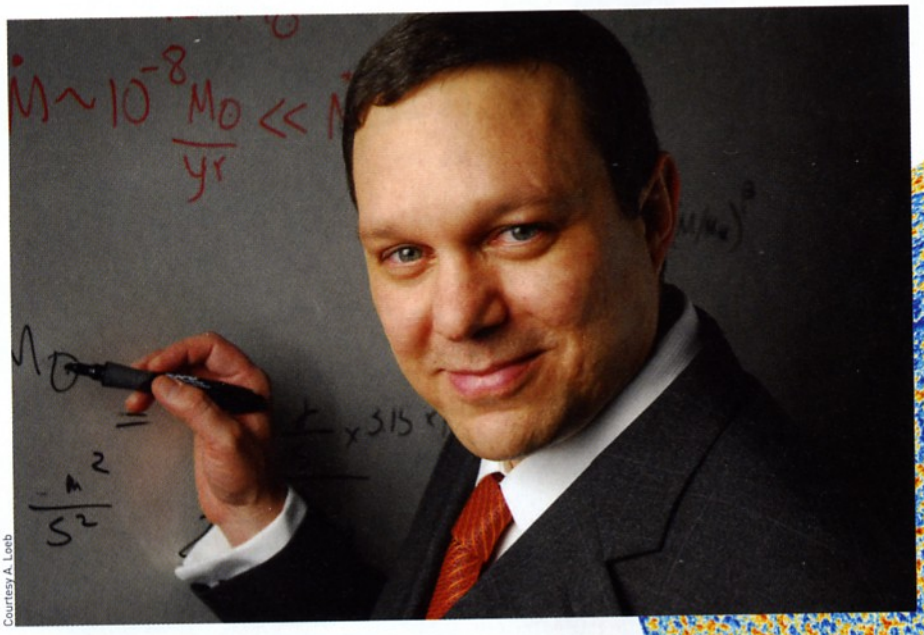
525

L'HYPOTHÈSE FOLLE D'UN COSMOLOGISTE DE HARVARD

LES PLANÈTES DU BIG BANG

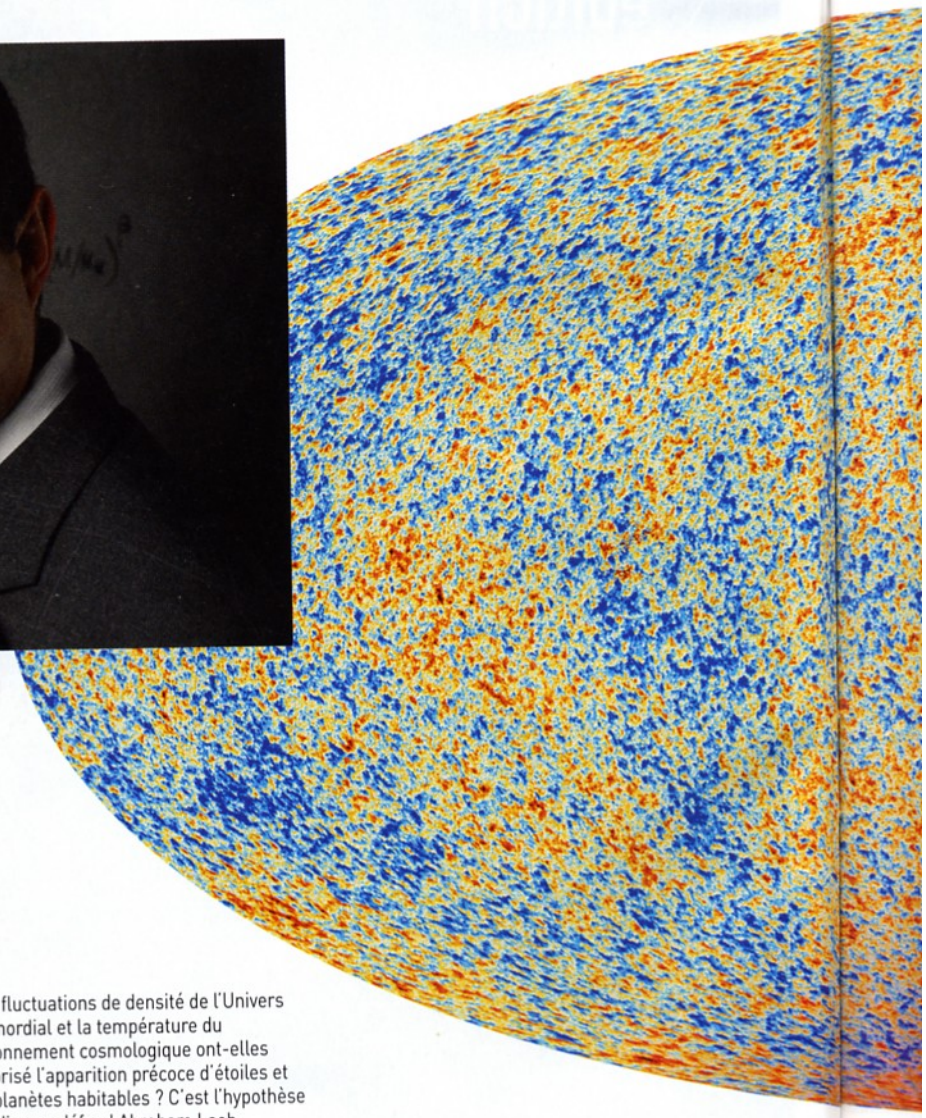
Des planètes habitables ont-elles peuplé l'Univers au tout début de l'expansion cosmique, seulement 15 millions d'années après le big bang ? Fascinante et iconoclaste, cette hypothèse publiée par le cosmologiste Abraham Loeb interpelle les astrophysiciens. Faut-il revisiter le grand récit de l'Univers ?

David Fossé



Courtesy A. Loeb

Le cosmologiste Abraham Loeb, 51 ans, dirige l'Institut théorie et calcul au centre d'astrophysique de l'université de Harvard. Auteur de plusieurs ouvrages de référence consacrés aux premières étoiles et galaxies de l'Univers, il est aussi connu pour son inventivité. Il est notamment à l'origine d'une technique efficace de détection des petites planètes extrasolaires (microlentille gravitationnelle).



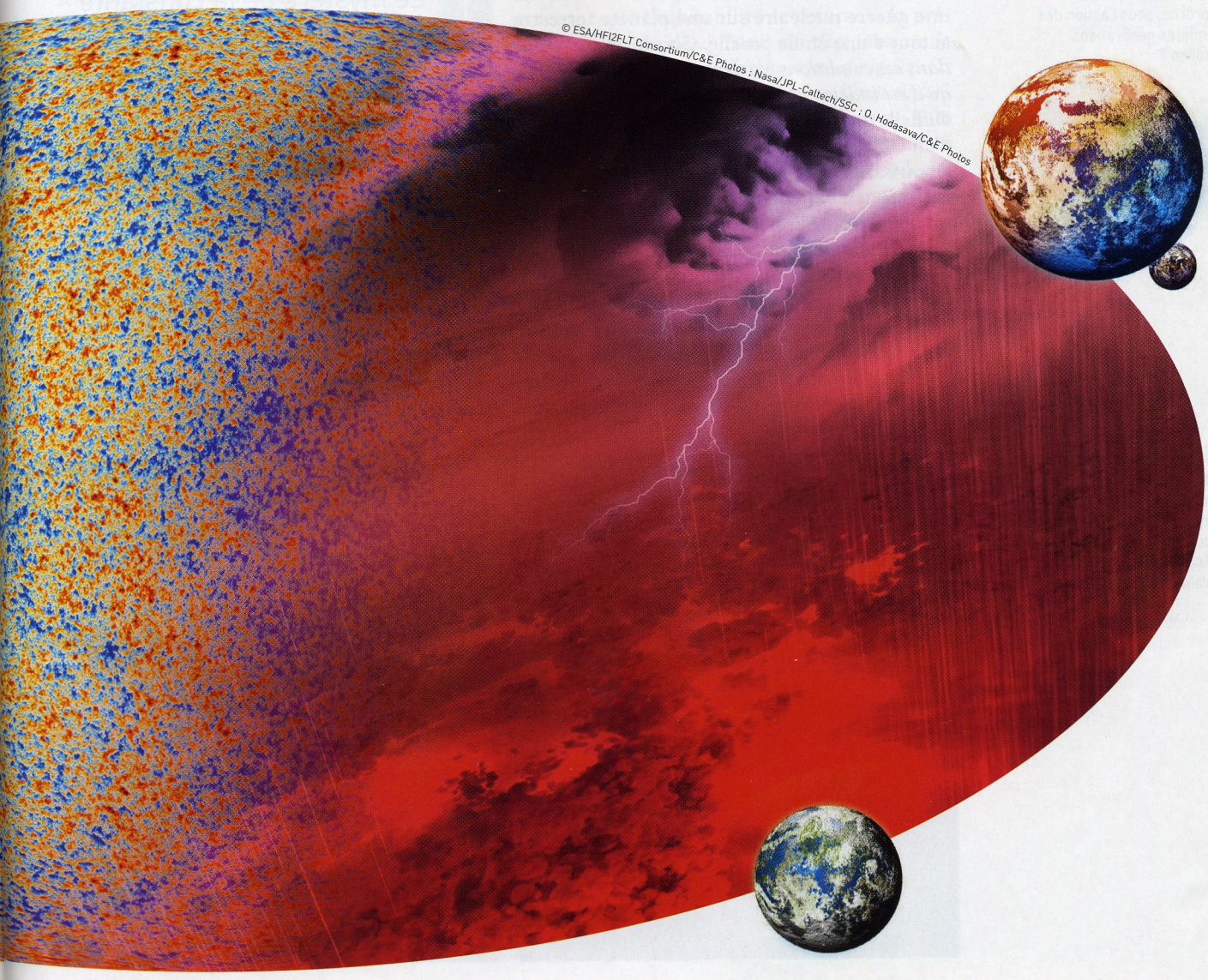
Les fluctuations de densité de l'Univers primordial et la température du rayonnement cosmologique ont-elles favorisé l'apparition précoce d'étoiles et de planètes habitables ? C'est l'hypothèse hardie que défend Abraham Loeb.

LA vie est peut-être apparue bien avant les galaxies. Sur une planète flottante, détachée de toute étoile. Et à une époque reculée de l'évolution de l'Univers où ce dernier agissait tout entier comme un vaste incubateur. Inconcevable ? Pas selon Abraham (Avi) Loeb, professeur au département d'astronomie de Harvard et membre de l'Académie des arts et des sciences américaine. Dans un étonnant article soumis en décembre à la revue *Astrobiology* — cinq pages à peine ! —, ce cosmologiste respecté assure que l'Univers aurait connu, précocement, une *"période habitable"* de quelques millions d'années. *"Quinze millions d'années après le big bang, la température du rayonnement cosmologique était encore de 30 °C"*, remarque le chercheur.

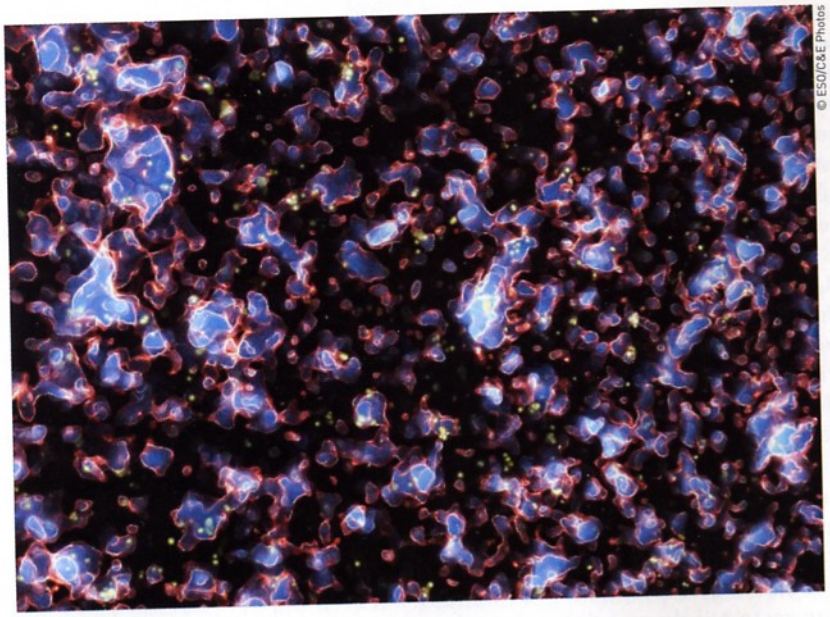
Émise 380 000 ans après le big bang, lors de la formation des premiers atomes, cette lumière à 3 000 °C n'a cessé de se refroidir sous l'effet de l'expansion cosmique. Aujourd'hui, elle n'est plus que de – 270 °C (3 K) et aurait bien du mal à réchauffer quoi que ce soit. Mais à cette époque primitive, elle baignait tout l'espace d'une lueur tiède. *"Des planètes rocheuses plongées dans ce bain pouvaient posséder de l'eau liquide où qu'elles se trouvent dans l'Univers, même loin de toute étoile"*, souligne Avi Loeb. De nos jours, ce que les astronomes appellent la zone habitable est l'étroite région autour d'une étoile où la température à la surface d'une planète est telle que de l'eau peut y couler. À l'époque qui intéresse le chercheur, cette zone habitable s'étendait à l'Univers tout entier...

Une perspective vertigineuse ! Et qui frappe d'autant plus que, même dans notre propre galaxie à l'heure actuelle, il y aurait deux fois plus de planètes flottantes, liées à aucune étoile, que d'étoiles elles-mêmes. Dans cet Univers jeune où les galaxies n'avaient pas encore eu le temps de s'assembler, où les étoiles étaient des monstres isolés de plus de 100 masses solaires, d'innombrables planètes auraient pu voir éclore le vivant, sous un ciel désespérément noir.

Que reste-t-il de ce printemps précoce ? Un Univers débordant de vie, imagine volontiers Avi Loeb. *"Si nous ne le percevons pas, c'est tout sim-*



© ESA/HFI2FLT Consortium/C&E Photos ; Nasa/JPL-Caltech/SSC ; O. Hodasava/C&E Photos



© ESO/C&E Photos

Une période favorable à la vie a-t-elle eu lieu avant même la réionisation de l'Univers — cette époque où il est devenu transparent de proche en proche, sous l'action des premières générations d'étoiles ?

plement parce qu'à l'échelle de l'Univers, les manifestations de la vie sont très discrètes", estime le chercheur. L'année dernière, il a voulu vérifier si, avec les moyens actuels, nous pourrions détecter une guerre nucléaire sur une planète terrestre autour d'une étoile proche. Conclusion : *"Même dans ces conditions extrêmes, le signal est si faible qu'il est indétectable."*

Difficile toutefois d'utiliser cet argument à l'appui d'un Univers fertile ! En fait, l'idée que le cosmos ait pu être entièrement habitable dans sa jeunesse laisse certains astronomes dubitatifs. *"L'hypothèse est amusante. Elle ferait un bon point de départ pour une nouvelle de science-fiction, mais elle est n'est pas assez détaillée pour être convaincante"*, juge ainsi Roland Lehoucq au CEA. Pour l'astrophysicien, Avi Loeb glisse sous le tapis plusieurs étapes clés qui mènent des étoiles à la vie. Nicolas Prantzos, directeur de recherche à l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP), est du même avis : *"Loeb a trouvé une petite fenêtre de quelques millions d'années pendant laquelle la température de l'Univers est de quelques dizaines de degrés Celsius, et il essaie d'y faire entrer la formation des étoiles, des planètes, et l'apparition de la vie. Mais c'est très court !"* Ce à quoi le chercheur américain répond par un éloge de la Nature, *"qui est souvent bien plus imaginative que nous"*.

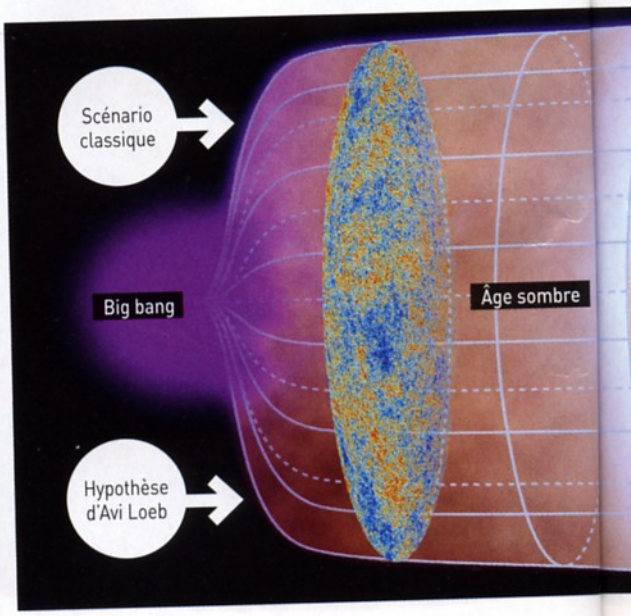
À l'observatoire de Bordeaux, Franck Selsis admet en tout cas que l'article d'Avi Loeb donne à réfléchir : *"Je ne me suis jamais demandé à quoi ressemblerait l'atmosphère d'une planète irradiée de tout côté par un rayonnement à 300 K* [soit environ 30 °C, NDLR]. *Mais maintenant cela m'intrigue !"* Pour le cosmologiste Benjamin Wandelt, de l'IAP, le principal intérêt de l'hypothèse d'Avi Loeb est peut-être celui-ci : elle oblige à prendre du recul. *"À côté du travail normal de la science, qui est de chercher des réponses à des questions précises, il est parfois important d'insister sur ce que l'on ne sait pas"*, souligne le chercheur. Voici ce que les planètes du big bang révèlent de notre ignorance.

1 Le mystère de la constante cosmologique

Mine de rien, c'est la question fondamentale qui motive le travail d'Avi Loeb : pourquoi la "constante cosmologique", introduite par Einstein en 1917 dans ses équations de l'espace-temps, est-elle si faible ? Pourquoi cette énergie du vide que l'on soupçonne être le moteur de l'accélération de l'expansion de l'Univers — la fameuse énergie "sombre" mesurée par l'observation des supernovae lointaines — est-elle 10^{120} fois (un "1" suivi de 120 "zéros" !) plus petite que ce que prédit la physique des particules ? Ce problème central de la physique donne lieu à des débats passionnés chez les théoriciens. Et à des prises de position étonnantes…

Pour l'astrophysicien Roland Lehoucq, l'hypothèse de planètes habitables 15 millions d'années après le big bang est *"amusante"*, mais elle n'est pas suffisamment étayée pour convaincre.

© A. Paulin/C&E Photos



"Nous pensons, donc l'Univers est", écrit ainsi Brandon Carter, de l'observatoire de Paris. En 1974, il a été le premier à formaliser le "principe anthropique", qui stipule que les propriétés de l'Univers doivent être telles qu'elles permettent l'apparition d'un observateur (lire son interview dans le *C&E* n° 456, mai 2008). Simple lapalissade, voire *"escroquerie intellectuelle"* pour ses détracteurs [1], ce principe est au contraire considéré comme un guide précieux chez certains cosmologistes. Et pour cause : c'est grâce à lui, dès 1987, que le prix Nobel de physique Steven Weinberg est parvenu à prédire la très intrigante petitesse de la constante cosmologique. Une prouesse qui reste le principal fait d'armes du principe anthropique.

"À l'évidence, l'objectif principal de l'article de Loeb est de saper l'explication 'anthropique' de Weinberg", constate Roland Lehoucq. Ce que le chercheur américain confirme : *"L'argument anthropique consiste à dire que, si la constante cosmologique avait été plus grande, alors les galaxies* [et par conséquent les étoiles, les planètes, et donc la vie consciente, NDLR] *ne seraient pas apparues."* En effet, elle aurait précipité l'expansion de l'Univers sans leur laisser le temps de se former. *"Sauf que je soutiens l'inverse : la vie a pu naître et évoluer bien avant la formation des galaxies !"* reprend Avi Loeb.

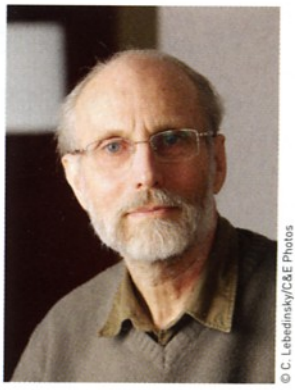
Dans le scénario du cosmologiste, une constante cosmologique un million de fois plus grande que celle que l'on mesure aujourd'hui est encore parfaitement compatible avec l'apparition de la vie. Autrement dit, l'existence d'observateurs n'explique en rien l'extrême petitesse de cette constante fondamentale. *"Plutôt que d'invoquer le principe anthropique, nous ferions bien de chercher une vraie explication physique à ce mystère"*, martèle le chercheur. Brandon Carter, lui, n'est pas du tout impressionné : *"Quinze millions d'années après le big bang, les conditions favorables à la vie dans l'Univers durent trop peu de temps pour permettre l'apparition d'une espèce consciente. Or, c'est bien à ce type de forme de vie que le principe anthropique s'applique."*

2 L'eau, source de vie ?

La vie a-t-elle seulement pu apparaître pendant la *"période habitable"* de l'Univers ? *"Si on la définit comme la durée pendant laquelle la température du rayonnement cosmologique est passée de 100 °C à 0 °C, celle-ci a duré environ 7 millions d'années"*, explique Avi Loeb. Dans ce laps de temps, d'éventuelles planètes dotées d'atmosphère ont pu voir couler de l'eau à leur surface. À ces températures en effet, *"il suffit d'une pression de 6 millibars sur une planète pour que l'eau existe sous forme liquide, autant dire que c'est très facile"*, remarque Franck Selsis.

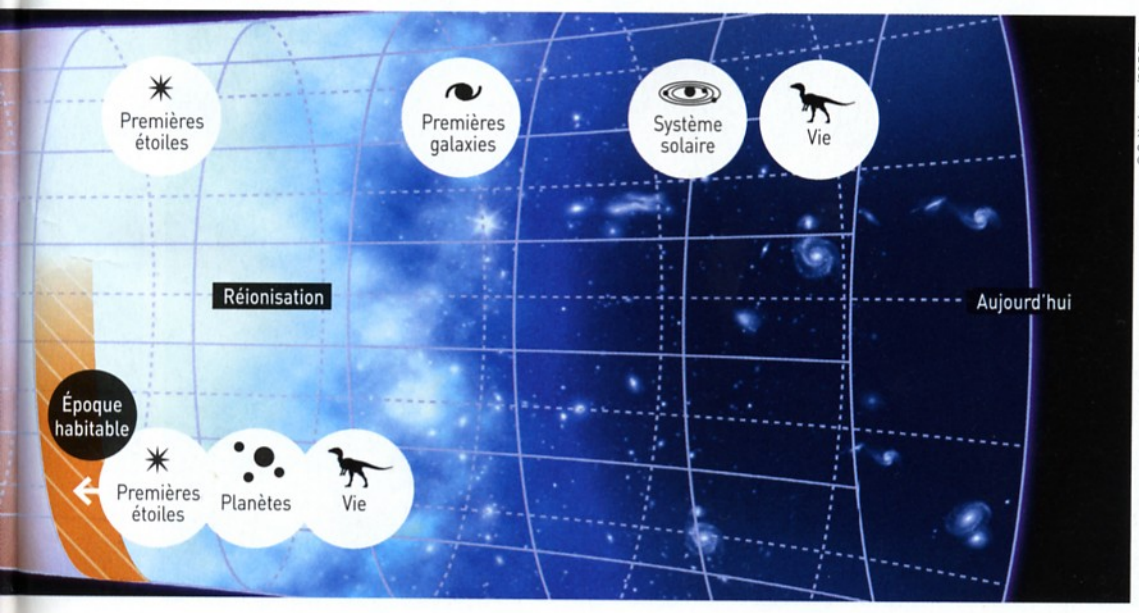
Plongez deux boules de glace comme les satellites de Jupiter Ganymède et Callisto dans le bain tiède de l'Univers jeune, et vous obtiendrez immédiatement un océan et une atmosphère. Deux planètes habitables, du moins si vous acceptez que l'habitabilité se résume à la présence d'eau liquide... *"Mais ça, c'est juste de la thermodynamique, de la physique de lycée. Or la vie, c'est tout sauf de la thermodynamique"*, rappelle Franck Selsis. Enveloppée dans un bain permanent de lumière infrarouge, une planète du big bang flottant loin des étoiles possèderait un océan, certes, mais aussi une atmosphère homogène et isotherme. Donc sans vent, sans nuages, sans climat. Un environnement triste à mourir pour l'apparition de la vie !

"La chimie du vivant nécessite des échanges d'énergie, c'est vrai, mais ils peuvent être facilement entretenus par l'activité géothermique d'une planète", réplique Avi Loeb. Après tout, presque 5 milliards d'années après sa naissance, le flux de



© C. Lebedinsky/C&E Photos

La possibilité d'une vie au début de l'Univers démontre-t-elle l'inutilité du principe anthropique formalisé en 1974 par Brandon Carter (ci-dessus) ?



© O. Hodasava/C&E Photos

L'avènement de la vie n'est peut-être pas le fruit d'une lente évolution. Dans le scénario d'Avi Loeb, le rayonnement qui baigne l'Univers agit comme un incubateur et la vie apparaît seulement 10 à 20 millions d'années après le big bang (l'instant le plus reculé dans le temps dont la physique puisse se saisir).

De l'eau liquide, mais pas de vent, pas de nuages et pas de pluie : un environnement triste à mourir pour l'apparition de la vie

chaleur produit par la Terre est encore de 50 TW (un "5" suivi de 13 zéros[2]). C'est le millième de ce que lui fournit le Soleil, mais même loin d'une étoile, cela suffirait sans doute à entretenir une forme de (sur)vie microbienne dans la croûte d'une planète rocheuse.

Reste que *"les formes de vie complexes qui existent aujourd'hui à la surface de la Terre sont liées à la présence du Soleil"*, remarque Franck Selsis. Dans un article publié en 2005 dans l'*International Journal of astrobiology*, le géochimiste danois Minik Rosing rappelle que l'activité de photosynthèse — le mécanisme inventé par le vivant pour capter directement l'énergie solaire — est un puissant moteur de la biochimie. La synthèse de matière organique à partir du carbone contenu dans le CO_2, par exemple, génère à lui seul trois fois plus d'énergie que la géothermie ! Autrement dit, c'est bien la proximité du Soleil qui a permis à une vie consciente d'éclore sur la Terre.

Dernier point important noté par Franck Selsis : *"Dans un Univers à 30 °C, la formation de glaces est impossible."* Ce n'est pas un détail puisque c'est la glace qui permet aux grains de poussière de s'agglomérer en planétésimaux, puis en planètes, et ce sont aussi de petits corps glacés qui ont apporté ses océans à la Terre ! L'immense couveuse imaginée par Abraham Loeb pourrait n'être qu'un vaste désert.

Même vue à distance, notre planète serait très différente si une vie évoluée ne s'y était pas développée. Or, celle-ci nécessite des transferts d'énergie incessants et importants que seule l'existence du Soleil rend possibles.

© Nasa/ESA/C&E Photos

3 La recette des planètes

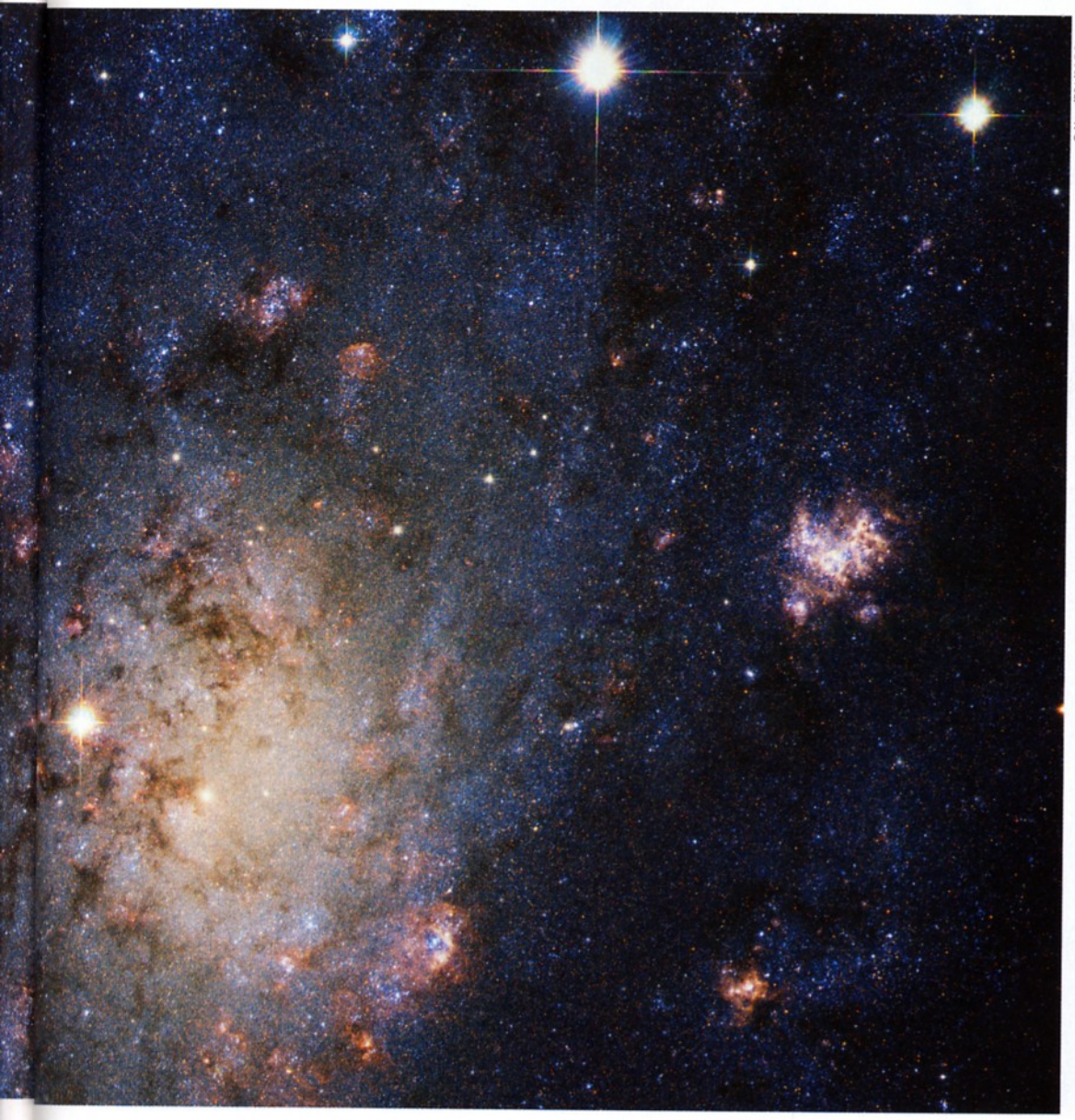
"Pour apparaître, la vie n'a pas seulement besoin d'eau. Il lui faut aussi une planète. Donc du silicium, du fer, du carbone, du phosphore, etc." reprend Franck Selsis. Autant d'éléments qui sont créés à l'occasion des explosions de supernovae. *"Sur le papier, des étoiles très massives, qui ne vivent que quelques millions d'années, ont pu ensemencer l'Univers rapidement"*, concède Nicolas Prantzos. Les modèles d'explosion stellaire indiquent qu'un astre 100 fois plus massif que le Soleil disperse environ 10 fois la masse de notre étoile sous forme de fer, d'oxygène, de carbone et autres éléments lourds (que les astronomes rangent sous la catégorie des "métaux").

Même si les astronomes manquent d'observations pour affiner leurs modèles — *"la seule étoile pour laquelle nous avons pu mesurer la masse d'oxygène et de fer produite dans une supernova est celle du Grand Nuage de Magellan, en 1987"* — c'est bien plus qu'il n'en faut pour fabriquer une Terre. Et même des millions de Terre... *"Mais ce n'est pas parce qu'une grosse quantité d'éléments chimiques est dispersée dans l'environnement d'une supernova que ce gaz va facilement former des planètes ! Il faut que les atomes se refroidissent, se mélangent, puis s'agrègent à nouveau...Dans notre galaxie, cela prend plusieurs millions d'années"*, tempère l'astrophysicien. Quinze millions d'années après le big bang, l'Univers s'était-il suffisamment enrichi en métaux pour former des planètes ?

"Les images les plus profondes du ciel réalisées avec le télescope spatial Hubble ont permis de découvrir des galaxies qui ont existé lorsque l'Univers n'avait que 5 % de son âge actuel. Leur rayonnement montre que des éléments lourds existaient déjà quelques centaines de millions d'années après le big bang", glisse Abraham Loeb. C'est le cas de z8_GND_5296, la plus loin-

© O.Daudet/C&E Photos

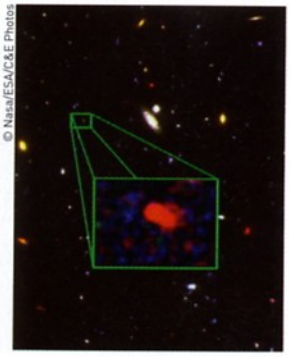
Nicolas Prantzos, de l'Institut d'astrophysique de Paris, est un spécialiste en nucléosynthèse stellaire. Il estime que la formation de planètes au début de l'univers est improbable.



© Nasa/ESA/C&E Photos

Lorsqu'une étoile explose en supernova (ici SN 2004dj, en haut à droite), un dixième de sa masse est dispersée dans l'espace sous forme d'atomes de carbone, d'azote, d'oxygène, de fer, etc. Ce sont eux, après un long processus de refroidissement et de recondensation en étoile, qui serviront à former les planètes.

La galaxie z8_GND_5296, repérée par le télescope Hubble dans la constellation de la Grande Ourse, est riche en éléments chimiques variés. Selon des mesures du Keck, on l'observe telle qu'elle était il y a 13 milliards d'années.



© Nasa/ESA/C&E Photos

taine galaxie connue de l'Univers. Découverte en 2013 par Steven Finkelstein (université du Texas) et ses collègues, grâce au télescope Keck, elle témoigne à la fois d'une intense formation d'étoiles et d'un enrichissement important en métaux. z8_GND_5296 affiche une métallicité de 40 % de celle du Soleil, bien que nous la voyons telle qu'elle était voici plus de 13 milliards d'années, 700 millions d'années seulement après le début de l'expansion cosmique !

Pouvoir remonter si loin dans le temps est une prouesse, mais cela ne suffit pas à sonder "l'époque habitable" imaginée par Avi Loeb. Le télescope spatial James Webb (JWST), successeur de Hubble attendu pour 2018, ne le pourra pas davantage. D'où cette autre façon de se poser la question de l'origine des premières planètes : dans une nébuleuse protosolaire, quelle est la quantité minimale d'éléments lourds nécessaire à leur formation ?

Les astronomes tentent de répondre à cette énigme en scrutant les étoiles. Puisque leur composition reflète celle de la nébuleuse dans laquelle elles sont nées, il faut chercher des planètes autour d'étoiles de métallicité de plus en plus faible. Peut-être atteindra-t-on un jour une valeur plancher, le seuil en deçà duquel les planètes ne peuvent plus se former ?

Une tendance semble se dessiner pour les planètes géantes, d'autant moins présentes que la métallicité de leur étoile hôte est faible. Mais pour les planètes rocheuses qui intéressent Avi Loeb, la métallicité n'a aucun impact. *"Cela dit, il faut bien garder à l'esprit que nous cherchons des planètes autour d'étoiles qui appartiennent au disque de la Voie lactée, comme le Soleil. Du coup, elles ne sont pas très différentes chimiquement"*, précise Nicolas Prantzos. Si certaines sont moins riches en métaux que notre étoile, ce n'est pas d'un facteur mille ou un million comme devaient l'être

La formation des étoiles, comme ici dans la nébuleuse de la Tarentule, est un processus complexe est encore mal compris. Notre ignorance est encore plus grande en ce qui concerne les premières étoiles.

© Nasa/CXC/JPL-Caltech/C&E Photos

les premiers astres de l'Univers[3]. Difficile, donc, de connaître la recette des premières planètes.

4 L'heure des premières étoiles

"La formation de planètes pendant l'époque habitable de l'Univers nécessite que la première génération d'étoiles soit apparue seulement 10 millions d'années après le big bang. C'est assez improbable, mais c'est possible", estime Avi Loeb. Une étoile se forme en accumulant du gaz qui se refroidit, se concentre, et qui à force de se concentrer atteint une pression telle dans son cœur que des réactions nucléaires s'y déclenchent. Pour démarrer, ce mécanisme requiert l'existence *a priori* d'une surdensité locale du gaz, héritée de l'Univers primordial, qui permet une naissance d'autant plus rapide et précoce que celle-ci est importante.

Problème : *"Les halos de matière suffisamment denses pour permettre la naissance d'étoiles après seulement 10 millions d'années d'évolution cosmique sont très rares"*, prévient Benjamin Wandelt. Si l'on en croit les observations du satellite de cosmologie Planck, auxquelles il a participé, la distribution de fluctuations de densité dans l'Univers primordial suit une classique courbe en cloche (ou gaussienne) : tandis que les fluctuations moyennes sont pléthore, le nombre de surdensité ou de vides s'effondre vite lorsqu'on s'écarte de la moyenne. *"Les halos susceptibles d'abriter les premières planètes ne représentent qu'une infime partie (2.10^{-17}) de l'inventaire cosmique de l'époque"*, explique Avi Loeb.

Planck, par ailleurs, n'en voit aucune trace dans la carte du rayonnement cosmologique. Pour autant, le chercheur américain ne se décourage pas. Le satellite de cosmologie observe avec une résolution de 5 minutes d'arc et il est tout à fait possible que le fond diffus présente de fortes surdensités à plus petite échelle. *"L'existence de telles fluctuations est permise dans les modèles d'inflation cosmique"*, indique Benjamin Wandelt. En exploitant une lacune dans nos connaissances en cosmologie, Avi Loeb permet donc à ces astres précoces d'exister. Du moins sur le papier.

Pour en avoir le cœur net, peut-on espérer voir un jour ces étoiles ? *"C'est l'un des axes majeurs de la cosmologie dans les prochaines années"*, répond Benjamin Wandelt. Les astrophysiciens ne cherchent pas à distinguer les étoiles elles-mêmes, mais leur effet sur l'Univers : sa réionisation. Avant la naissance des étoiles, le gaz ambiant d'hydrogène était neutre, c'est-à-dire composé d'atomes et de molécules électriquement neutres. Les photons ultraviolets des premières étoiles, en arrachant des électrons aux atomes d'hydrogène, ont ionisé ce gaz qui, du coup est devenu transparent à la lumière. *"Cette réionisation doit avoir laissé une trace dans le rayonnement émis 380 000 ans après le big bang. En interagissant avec les électrons arrachés aux atomes, le rayonnement cosmologique a dû se polariser. Nous cherchons activement cette polarisation dans les données de Planck"*, révèle le cosmologiste.

L'autre manière de percevoir cette réionisation de l'Univers est d'étudier directement l'émission de l'hydrogène à 21 cm de longueur d'onde. *"Plusieurs projets sont en cours pour ce sujet qui va devenir très chaud : MWA en Australie, Paper en Chine, Lofar en Europe, et surtout SKA, qui verra le jour d'ici dix ans"*, s'enthousiasme Benjamin Wandelt. Cela ne vous étonnera pas, Abraham Loeb est l'un des spécialistes mondiaux de cette recherche. •

(1) Lire par exemple Une brève histoire de l'Univers, *du cosmologiste Joseph Silk (2003).*

(2) La consommation énergétique de l'humanité est de 14 TW.

(3) Le record de faible métallicité pour une étoile à planètes est détenu par HIP 13044 et HIP 11952, environ cent fois moins dotées en atomes lourds que le Soleil. Mais depuis janvier 2014, la présence de planètes autour de ces étoiles est contestée.

Courtesy B. Wandelt

À l'Institut d'astrophysique de Paris, Benjamin Wandelt reconnaît à l'hypothèse d'Abraham Loeb le mérite de faire réfléchir les astronomes sur ce qu'ils savent vraiment ou ignorent encore.

© Ska

Plusieurs réseaux de radiotélescopes dans le monde cherchent désormais des traces de la première génération d'étoiles dans l'Univers. Ici, une vue d'artiste du futur instrument SKA (vue d'artiste).