

# 15 LE BIG BANG

*Qu'est-ce qui ne va pas avec cette représentation de la naissance de l'univers ?*



[educacao.umcomo.com.br/articulo/como-explicar-a-teoria-do-big-bang-as-criancas-309.html](http://educacao.umcomo.com.br/articulo/como-explicar-a-teoria-do-big-bang-as-criancas-309.html)

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

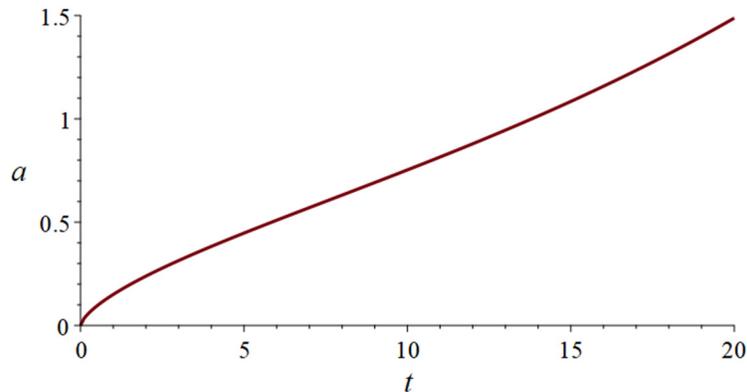
## 15.1 QU'EST-CE QUE LE BIG BANG ?

### Un facteur d'échelle nulle

Vous avez sûrement remarqué que beaucoup de modèles présentés au chapitre précédent arrivaient à la conclusion suivante : à un certain moment dans le passé, le facteur d'échelle était nul. C'est d'ailleurs le cas du modèle  $\Lambda_{\text{cdm}}$ , qui est le modèle accepté en ce moment.

Ce facteur d'échelle nulle à un certain moment dans le passé implique que l'univers est né à ce moment. Selon les données actuelles, l'univers est apparu il y a 13,80 milliards d'années.

La théorie décrivant l'évolution de l'univers à partir d'un  $a = 0$  porte le nom de théorie du *Big Bang*.



### Qu'est-ce qu'il y avait avant l'apparition de l'univers ?

Si l'univers est né à un certain moment, cela amène bien sûr la question « Qu'est-ce qu'il y avait avant le Big Bang ? ».

En fait, c'est impossible de répondre à cette question. La naissance de l'univers marque la naissance de l'espace-temps. Avant cette naissance, il n'y avait pas d'espace ni de temps. Peut-on demander ce qu'il y avait avant la naissance de l'univers, s'il n'y avait pas de temps ? Que signifie le mot *avant* si le temps n'existe pas ?

(Petite note historique : Saint-Augustin (4<sup>e</sup> siècle apr. J.-C.) était arrivé à la même conclusion pour répondre à ceux qui lui demandaient ce que faisait Dieu avant de créer l'univers. La question ne se pose pas, car Dieu aurait créé le temps en même temps qu'il a créé l'univers et il n'y a donc pas d'*avant* à la création du monde par Dieu.)

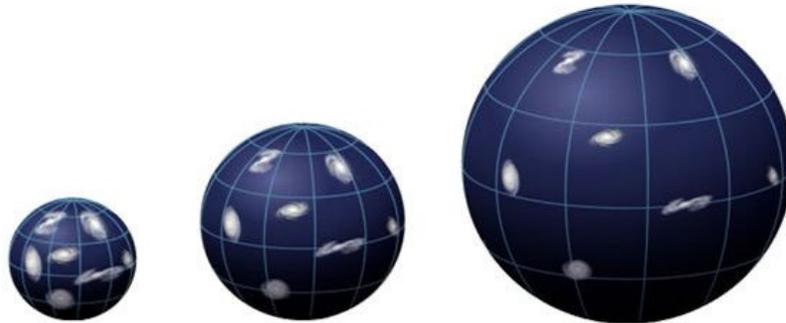
### De mauvaises conceptions

On présente très souvent la naissance de l'univers comme une gigantesque explosion ayant projeté de la matière dans toutes les directions. Pas besoin de fouiller bien longtemps pour trouver une animation de cette conception.

<https://www.youtube.com/watch?v=WksTp06Go2c>

Ces animations sont complètement impossibles. La naissance de l'univers n'est pas une explosion. Voici pourquoi cette animation n'est pas possible.

- 1) On ne pourrait pas voir la naissance de loin comme c'est le cas ici parce qu'il n'y a pas d'espace avant le début de l'univers. L'espace naît avec l'univers pour ensuite prendre de l'expansion. On ne peut pas être en dehors de l'univers puisqu'il n'y a pas d'espace en dehors de l'univers.
- 2) Dans le film, on voit la matière être projetée et on a l'impression que la matière se dirige vers l'observateur comme s'il y avait une gigantesque explosion. On pourrait même dire qu'il faudrait qu'il fasse attention pour ne pas recevoir un morceau dans la face. Ce n'est pas du tout ce que verrait un observateur quand l'univers était tout jeune. On a vu que l'expansion de l'univers fait en sorte que n'importe quel observateur dans l'univers voit la matière s'éloigner de lui avec une vitesse qui augmente avec la distance selon la loi de Hubble. Peu importe la valeur du facteur d'échelle, on voit toujours la matière s'éloigner de nous (sauf quand le facteur d'échelle diminue dans un univers fermé). C'est vrai maintenant et c'était vrai quand l'univers était tout jeune. La seule différence, c'est que le taux d'expansion de Hubble était très grand quand l'univers était très jeune. Notre observateur devrait donc toujours voir la matière s'éloigner de lui, jamais se diriger vers lui.
- 3) Dans le film, on voit une explosion se produire à un endroit précis. Ce genre d'animation amène bien sûr la question : « Où a eu lieu cette explosion exactement ? » et « Est-ce que le centre de l'univers est situé à l'endroit où a eu lieu l'explosion ? » En réalité, l'origine de l'univers est partout dans l'univers. Prenons une analogie en deux dimensions pour illustrer le tout. Imaginons un univers à courbure positive qui grandit. En deux dimensions, un tel univers peut être représenté par la surface d'un ballon qui gonfle.



[scienceblogs.com/startswithabang/2013/06/28/our-great-cosmic-motion/](http://scienceblogs.com/startswithabang/2013/06/28/our-great-cosmic-motion/)

Imaginons cet univers quand il est très jeune, donc quand le ballon est minuscule. Peut-on se demander à quel endroit de la surface du ballon a commencé le ballon ? Bien sûr que non. Si le ballon apparaît soudainement pour que la surface prenne ensuite de l'expansion, c'est toute la surface du ballon qui apparaît en même temps pour ensuite prendre de l'expansion. On ne peut pas dire que le ballon apparaît à un endroit de l'espace parce que l'espace, c'est la surface du ballon. Il n'y a pas de surface du ballon (donc pas d'espace) et soudainement, toute la surface apparaît. C'est exactement ce qui s'est passé avec l'univers. L'espace qui forme l'univers

apparaît soudainement et tous les points de l'espace apparaissent en même temps dans les mêmes conditions pour ensuite s'étirer. Cette apparition de l'espace se fait partout en même temps et non pas à un endroit précis dans un espace qui existait auparavant. La naissance de l'univers a donc eu lieu partout dans l'univers en même temps.

On doit même comprendre qu'il n'y a pas du tout d'explosion. L'univers apparaît soudainement, sans explosion, et prend de l'expansion, ce qui dilue la matière. Il n'y a pas d'explosion qui projette la matière dans toutes les directions.

J'ai eu beau chercher, je n'ai jamais trouvé d'animation montrant correctement ce qu'on verrait dans un univers très jeune. Le film commencerait par l'apparition de l'espace. Il ne peut pas y avoir de bout noir dans le film avant l'apparition de l'univers parce qu'il n'y a pas d'espace ni de temps avant l'apparition de l'espace. On ne peut pas être nulle part et de toute façon, il n'y a pas d'« avant le Big Bang » puisque le temps apparaît avec la naissance de l'univers. La seule chose qu'on verrait dans le film, c'est la matière très dense et très chaude qui s'éloigne de nous. À mesure que l'expansion progresse, la température baisserait. Au lieu de cela, on ne trouve que des films montrant une explosion projetant la matière dans toutes les directions, même sur des sites d'établissements de très haut niveau.

Mais alors, pourquoi parle-t-on alors de Big Bang s'il n'y a même pas d'explosion ? Ce nom fut donné par Fred Hoyle, un opposant de la théorie, en 1949. Curieusement, c'est ce nom qui est resté.

## 15.2 COMMENT EST APPARUE LA THÉORIE DU BIG BANG

### Les premiers modèles avec $a = 0$

Dans les années 20, personne n'envisage que l'univers ait pu avoir  $a = 0$  dans le passé. Friedmann et Lemaitre avaient montré qu'il y avait des solutions de la relativité générale pour lesquelles l'univers a  $a = 0$  à un moment dans le passé, mais personne n'envisageait que ces solutions puissent véritablement décrire notre univers.

La situation change dans les années 30. En 1931, Lemaître est le premier qui envisage que notre univers ait pu naître à un certain moment. Il va même jusqu'à tenter de décrire comment devait être cet univers à ses débuts avec la théorie de l'*atome primitif*. Dans cette théorie, il y aurait eu, au départ, un genre de gros noyau atomique de la taille du Système solaire et cet atome se serait désintégré ensuite pour former les atomes actuels.

Chose certaine, dans les années 30, quelques physiciens commencent sérieusement à penser qu'un des modèles dans lequel l'univers a  $a = 0$  à un certain moment dans le passé pourrait être un modèle qui décrit véritablement notre univers. Toutefois, la question des débuts de l'univers n'est pas vraiment abordée par ceux qui acceptent un univers avec

$a = 0$ . C'est que plusieurs pensent que, même si les équations arrivent à  $a = 0$ , on n'avait pas véritablement  $a = 0$ .

## Avait-on vraiment un facteur d'échelle nulle ?

En fait, la théorie du Big Bang ne prétend pas qu'elle peut expliquer l'évolution de l'univers jusqu'à  $a = 0$ .

On arrive à la conclusion que le facteur d'échelle était nul il y a 13,80 milliards d'années si on suppose que la relativité générale est toujours bonne, peu importe la densité de la matière. Toutefois, on est presque certain que la relativité générale ne s'applique pas si la densité est supérieure à  $10^{93}$  kg/m<sup>3</sup>, une densité énorme appelée la *densité de Planck*. Elle pourrait même n'être plus valide avec des densités moins élevées que la densité de Planck et il est donc fort possible que le facteur d'échelle de l'univers ait changé d'une autre façon au tout début de l'univers que celle prédite par la relativité générale et il est même possible que le facteur d'échelle n'ait jamais été nul.

Il n'est pas exclu même que le temps ne soit pas un concept applicable si la relativité générale n'est plus valide. Peut-on parler de ce qui se passait quand la densité de l'univers était supérieure à la densité de Planck si le concept de temps n'est plus valide ?

C'est ainsi que Einstein, de Sitter et Lemaître voyaient la situation et c'est encore ainsi que pratiquement tous les physiciens la voient. Comme il n'y a pas de théorie pouvant décrire un univers très compact, on ne peut pas savoir comment  $a$  a changé au départ et on laisse cette question de côté en espérant qu'on puisse étudier cette question un jour. En d'autres mots, les physiciens ne parlent que très rarement de la naissance de l'univers. On ne sait pas comment l'univers est apparu, ni même s'il est apparu ou s'il a toujours été là. Peut-être qu'il y a un âge infini, ou peut-être qu'il y a un âge limité (et peut-être qu'on ne peut rien dire sur son âge si le concept de temps n'est pas valide avant un certain instant). Cela signifie que ce qu'on appelle la théorie du Big Bang ne décrit pas du tout la naissance de l'univers. Elle décrit plutôt comment l'univers évolue après sa naissance, à partir d'un certain instant.



### Erreur fréquente : penser que la théorie du Big Bang explique comment l'univers est né

La théorie explique l'évolution de l'univers après sa naissance, mais ne dit rien sur sa naissance. En fait, on ne sait même pas si l'univers est né et tout ce qu'on peut lire ou entendre sur cette naissance n'est que pure spéculation.

## Des univers en expansion sans $a = 0$

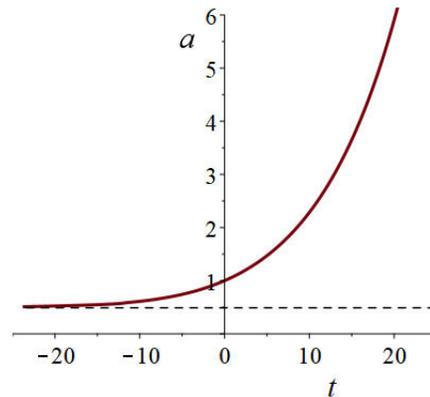
Si la plupart évitent la question de la naissance en se disant que la théorie n'est pas valide quand la densité devient trop grande, d'autres cherchent des solutions de rechange. Mais

existe-t-il des modèles d'univers en expansion qui n'arrivent pas à  $a = 0$  à un moment dans le passé ?

### Le modèle de Lemaître-Eddington

En 1927, Lemaître propose un modèle dans lequel l'univers prend de l'expansion à partir d'un univers ayant une valeur initiale de  $a$  non nulle.

On a déjà mentionné ce modèle au chapitre précédent. Initialement, on a un univers d'Einstein où les effets de la gravitation sont compensés par l'énergie du vide. En fait, l'énergie du vide domine légèrement sur l'énergie de la matière dans le modèle de Lemaître-Eddington de sorte qu'il va lentement commencer à prendre de l'expansion. Cette expansion deviendra de plus en plus importante à mesure que la matière va se diluer. Par exemple, voici un graphique montrant le facteur d'échelle en fonction du temps d'un univers ayant initialement  $a = 0,5$ .

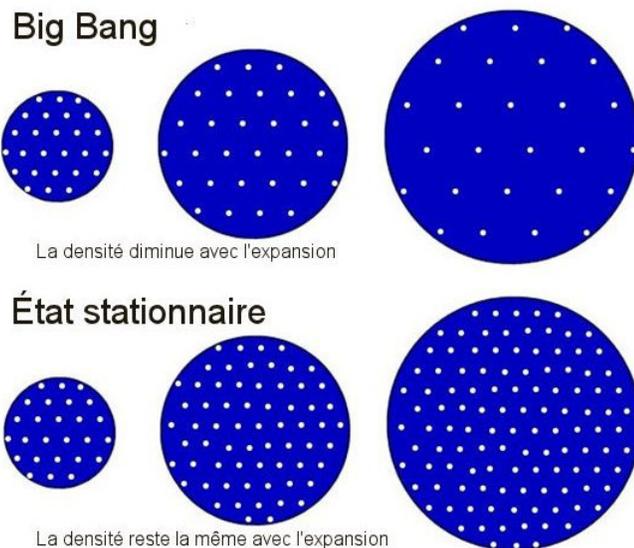


On voit que c'est possible d'avoir un modèle sans  $a = 0$ , mais c'est le seul que la relativité générale permet pour un univers contenant une quantité fixe de matière. Par contre, il faisait appel à l'énergie du vide, un concept qui ne semblait plus nécessaire pour plusieurs. De plus, il restait à expliquer comment l'univers avait pu se retrouver initialement dans un état où les effets de la gravitation étaient presque exactement compensés par ceux de l'énergie du vide. Comment les densités avaient-elles pu s'ajuster pour avoir un état initial si précis ?

### La théorie de l'état stationnaire

Cette théorie est apparue un peu plus tard. Elle a été proposée par Fred Hoyle, Hermann Biondi et Tomas Gold en 1948.

Dans cet univers, il n'y a pas d'énergie du vide, il n'y a que de la matière. Toutefois, dans la théorie de l'état stationnaire, la densité de matière reste constante. C'est bien différent de ce qui se passe avec les théories issues de la relativité générale dans lesquelles l'expansion dilue la matière, ce qui entraîne une diminution de la densité.



[www.physicsoftheuniverse.com/dates.html](http://www.physicsoftheuniverse.com/dates.html)

Mais comment la densité de matière pourrait-elle rester constante si l'univers prend de l'expansion ? On proposa que la densité reste constante parce qu'il apparaît spontanément de la matière dans l'univers et que cette apparition compense exactement l'effet de l'expansion. L'idée n'est pas complètement farfelue parce qu'il ne faut pas faire apparaître tant de matière que cela. Voyons à quel rythme diminue la densité de l'univers s'il n'y a pas création de matière. Sans création de matière, la densité diminuerait avec le cube de facteur d'échelle.

$$\rho_m = \frac{\rho_{c0}}{a^3}$$

(On a supposé que l'univers est plat et que sa densité est donc égale à la densité critique.)  
Le taux de variation de la densité est alors

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_m}{dt} &= \frac{d}{dt} \left( \frac{\rho_{c0}}{a^3} \right) \\ &= \rho_{c0} \frac{da^{-3}}{dt} \\ &= \rho_{c0} \left( -3a^{-4} \frac{da}{dt} \right) \\ &= -\frac{3\rho_{c0}}{a^3} \frac{1}{a} \frac{da}{dt} \end{aligned}$$

Mais puisque

$$H = \frac{1}{a} \frac{da}{dt}$$

on a

$$\frac{d\rho_m}{dt} = -\frac{3\rho_{c0}}{a^3} H$$

Ce taux est donc, en ce moment, de

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_m}{dt} &= -\frac{3\rho_{c0}}{a^3} H_0 \\ &= -\frac{3 \cdot 5,10 \frac{m_p}{m^3}}{1^3} \cdot 6,89 \times 10^{-2} Ga^{-1} \\ &= -1,05 \frac{m_p}{m^3 Ga} \end{aligned}$$

Il suffirait donc de faire apparaître 1,05 proton par m<sup>3</sup> par milliard d'années (ou 1,05 proton par km<sup>3</sup> chaque année) pour compenser cette baisse de densité. Ce n'est vraiment pas beaucoup. Restait quand même à trouver un mécanisme qui expliquerait comment la matière pouvait apparaître à partir de rien. On n'y est jamais arrivé.

(Notez que l'idée de création continue de matière n'était pas nouvelle. Elle fut brièvement explorée auparavant, dans des contextes souvent différents, par William Crookes en 1886, par Hermann Nerst en 1912, William McMillan en 1918, par Oliver Lodge au début des années 20, par James Jeans en 1928, par Robert Milikan en 1928, par Richard Tolman en 1929, par Paul Dirac en 1937, par Pascual Jordan en 1928 et par Edward Milne en 1946.)

Qu'importe le mécanisme, voyons ce qui arrive si la densité est constante. On a alors l'équation

$$\frac{kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho_{m0} - H^2$$

On va prendre le cas le plus simple : un univers plat, donc qui a la densité critique. On a alors

$$0 = \frac{8\pi G}{3} \rho_{c0} - H^2$$

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_{c0}$$

Si la densité reste toujours la même, alors  $H$  est une constante qui a la même valeur qu'en ce moment, c'est-à-dire  $H_0$ . Si le taux d'expansion est constant, alors

$$\frac{1}{a} \frac{da}{dt} = H_0$$

$$\frac{da}{a} = H_0 dt$$

En intégrant de chaque côté, on arrive à

$$\int \frac{da}{a} = \int H_0 dt$$

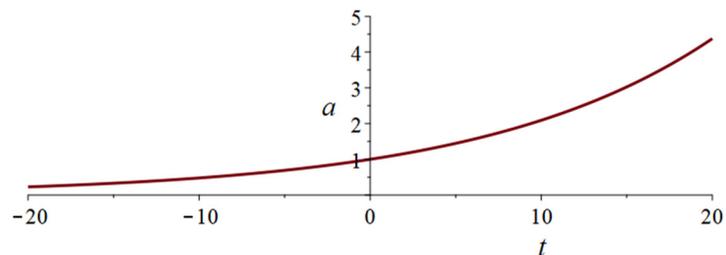
$$\ln a = H_0 t + K$$

où  $K$  est une constante d'intégration. En posant que  $a = 1$  et que  $t = 0$  en ce moment, on arrive à une valeur nulle pour la constante. On a alors

$$\ln a = H_0 t$$

$$a = e^{H_0 t}$$

Le graphique de droite montre le facteur d'échelle en fonction du temps dans ce modèle si  $H_0 = 67,4$  km/s/Mpc.



Dans ce modèle, le facteur d'échelle n'atteint jamais 0 et l'univers a un âge infini.

Avec une densité constante, cet univers garde toujours les mêmes propriétés. Sa densité et sa température ne changent pas, d'où son qualificatif d'*univers stationnaire*.

Cette théorie a eu un peu de succès entre 1948 et 1965, particulièrement au Royaume-Uni.

On peut souvent lire que le problème de l'âge de l'univers était le principal argument en faveur de cette théorie. C'est vrai que la mauvaise calibration des céphéides faisait qu'on obtenait des distances de galaxies beaucoup trop petites et, ainsi, une valeur de  $H_0$  beaucoup trop grande, de l'ordre de 500 km/s/Mpc. Une telle valeur du taux d'expansion donnait un âge de seulement 1,3 milliard d'années à l'univers pour le modèle d'Einstein-de Sitter. Comme à cette époque on pensait que la Terre avait entre 2 et 3 milliards d'années, il y avait un problème. Ce problème n'existait pas avec la théorie de l'univers stationnaire qui avait un âge infini. Toutefois, ce problème n'était pas si grave puisque d'autres modèles relativistes, comme le modèle de Lemaitre (identique au modèle  $\Lambda_{\text{cdm}}$ ), donnaient des âges plus grands. De plus, ce problème devint beaucoup moins important quand on découvrit le problème de calibrage des céphéides en 1952 et qu'on corrigea la valeur de  $H_0$  et de l'âge de l'univers en 1958. En réalité, l'argument de l'âge de l'univers n'était pas très important et il n'était qu'un seul élément parmi une douzaine d'observations que devaient expliquer toutes les théories cosmologiques de l'époque.

## Naissance de la théorie du Big Bang

La théorie du Big Bang telle qu'on la connaît aujourd'hui est née dans les années 40. En 1940, George Gamow mentionne, dans un ouvrage de vulgarisation, que peu après le  $a = 0$ , l'univers devrait être très compact et chaud et qu'il serait alors possible que la température ait été suffisamment grande pour qu'il y ait de la fusion nucléaire. Gamow pense qu'il doit être possible d'expliquer l'origine des éléments par la fusion nucléaire dans ce jeune univers dense et chaud.

À partir de 1945, George Gamow et ses collaborateurs Ralph Alpher et Robert Herman développent cette théorie et tentent de montrer que tous les éléments se sont formés dans cet univers jeune très chaud et dense. On doit ajuster un peu le tir quand Hoyle (un des fondateurs de la théorie de l'état stationnaire), Fowler, M. Burbidge et G. Burbidge montrent, au début des années 50, qu'on peut expliquer l'abondance de presque tous les éléments par les réactions de fusion dans les étoiles. Seule l'abondance des éléments légers (H, He, Li et Be) restait inexplicable par la fusion dans les étoiles. Dès 1953, on arrive à expliquer l'abondance relative de ces éléments légers avec la théorie du Big Bang. Ce sont essentiellement Alpher, Herman et James W. Follin qui développèrent cette théorie. Notons aussi les contributions de Roger Tayler et Hoyle à ce problème (même si Hoyle est un fondateur de la théorie rivale de l'état stationnaire...). Aujourd'hui, la théorie est encore plus complète et cohérente et c'est ce qui sera présenté plus loin. L'accord parfait entre les observations et les prévisions d'abondance des éléments légers est un argument très fort en faveur du Big Bang.

Toutefois, il n'y a aucune observation directe qui permet de prouver la théorie du Big Bang avant les années 60. Plusieurs affirmaient alors, avec raison, que la cosmologie n'était pas vraiment une science. Selon eux, il s'agissait d'une simple spéculation mathématique puisqu'il n'y avait aucune façon de vérifier la théorie par des observations. On pourrait penser que le décalage des raies avec la distance était une preuve solide, mais ce décalage aurait pu être expliqué par d'autres théories. À peu près toutes les prédictions de la théorie étaient impossibles à vérifier. C'est un peu pour cela que presque personne ne développe la théorie du Big Bang entre 1954 et 1964 et que pratiquement tous les astronomes n'y accordent aucune attention.

À partir des années 60, on commence à faire des observations qui permettent de vérifier la théorie. En voici deux exemples. L'estimation de la proportion d'hélium dans l'univers faite en 1961, en accord avec les prévisions de la théorie du Big Bang, est une des premières preuves. Ensuite, on présente, toujours en 1961, le décompte des sources radio en fonction de leur distance de la Terre. Dans un univers stationnaire, l'univers est toujours dans le même état et les sources devraient être distribuées uniformément. Toutefois, les observations montrent que la densité des sources n'est pas uniforme et que la distribution correspond plutôt à ce que prévoit la théorie du Big Bang.

Toutefois, la preuve incontournable arrive en 1964 quand on découvre le rayonnement de fond cosmologique.

## 15.3 LE RAYONNEMENT DE FOND COSMOLOGIQUE

Un univers en expansion implique que la matière et l'énergie étaient beaucoup plus concentrées quand l'univers était plus jeune (sauf dans le modèle de l'état stationnaire). Or, cette densité d'énergie plus grande signifie également que la température de l'univers devait être plus grande dans le passé.

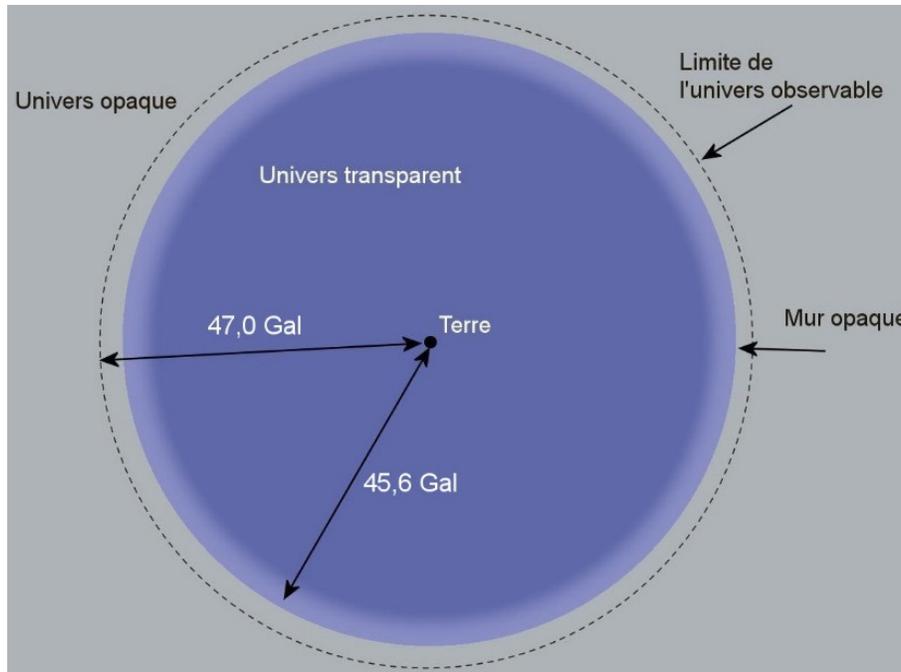
Sachant que l'univers jeune était très dense et très chaud, on peut prévoir qu'on devrait recevoir un rayonnement provenant de partout dans l'univers. C'est le rayonnement de fond cosmologique.

### L'origine du rayonnement

Peu importe le modèle de l'univers qu'on préconise, on doit accepter l'idée qu'en regardant des objets lointains, on les voit tels qu'ils étaient dans le passé. S'il a fallu 5 milliards d'années pour que la lumière arrive jusqu'à nous à partir d'un objet, on voit l'objet tel qu'il était il y a 5 milliards d'années.

En regardant très loin, on pourrait donc voir l'univers quand il était très jeune et donc très chaud. Si l'univers est plus chaud quand le facteur d'échelle est plus petit, cela signifie que l'univers très jeune a eu, à un moment donné, une température supérieure à 3000 K (c'était quand l'univers avait un âge de 371 800 ans). Or, à cette température, l'ionisation de

l'hydrogène devient importante et la densité des particules chargées est assez grande pour que le gaz soit opaque. En regardant assez loin, on devrait donc tomber sur un gaz opaque qui va agir comme un mur cachant tout ce qu'il y a plus loin. Ainsi, on ne peut pas voir jusqu'à la limite de l'univers observable puisque l'univers va devenir opaque avant d'arriver à cette limite. En ce moment, la limite de l'univers observable est théoriquement à 47,0 milliards d'années-lumière, mais l'univers devient opaque à une distance de 45,6 milliards d'années-lumière. Ceci est la distance actuelle de ce mur opaque. Toutefois, il ne faut pas oublier que ce mur opaque était beaucoup plus près de la Terre quand il a émis la lumière qu'on reçoit aujourd'hui (il était 1089,92 fois plus près).



Voit-on vraiment un mur de gaz opaque à 3000 K à 45,6 milliards d'années-lumière ? Non, mais on voit un mur de gaz opaque ayant une température de 2,7255 K. Il est vrai que ce gaz a initialement émis un rayonnement identique à celui émis par un objet chaud à près de 3000 K, mais pendant les 13,80 milliards d'années que ce rayonnement a pris pour arriver jusqu'à nous, la longueur d'onde du rayonnement a été étirée par l'expansion de l'univers.

Le rayonnement de ce mur opaque est un rayonnement de corps chaud avec un maximum d'émission à

$$\lambda_{pic} = \frac{2,898 \times 10^{-3} m \cdot K}{T}$$

Or, la longueur d'onde change avec le facteur d'échelle selon la formule

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{a_1}{a_2}$$

On a donc

$$\frac{\frac{2,898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}}{T_1}}{\frac{2,898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}}{T_2}} = \frac{a_1}{a_2}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{a_1}{a_2}$$

Si on choisit que l'instant 1 est maintenant ( $T = 2,7255 \text{ K}$  et  $a = 1$ ) et que l'instant est à un autre moment (température  $T$  et un facteur d'échelle  $a$ ), on arrive à

$$\frac{T}{2,7255 \text{ K}} = \frac{1}{a}$$

et finalement a

### Température de l'univers en fonction du facteur d'échelle

$$T = \frac{2,7255 \text{ K}}{a}$$

On dit que c'est la température de l'univers parce que ce serait la température d'un objet dans l'univers s'il n'y avait que ce rayonnement. Si on place un objet à 0 K dans l'univers, les photons qui arrivent sur l'objet vont le réchauffer. L'objet devient alors un corps chaud et commencera à son tour à émettre du rayonnement. Il se réchauffera ainsi jusqu'à ce que la puissance reçue soit égale à la puissance du rayonnement émis par le corps chaud. Ainsi, les corps noirs placés dans l'univers atteignent la même température que celle du rayonnement de corps chaud. Un corps noir placé dans l'univers en ce moment va donc atteindre une température de 2,7255 K. C'est relativement froid, mais ce n'est pas 0 K.

Revenons à notre mur opaque. Le rayonnement a été émis quand le facteur d'échelle de l'univers était de 1/1090,9, ce qui s'est produit quand l'univers avait un âge de 372 900 ans. La température à ce moment était donc de

$$T = \frac{2,7255 \text{ K}}{1089,9^{-1}}$$

$$= 2971 \text{ K}$$

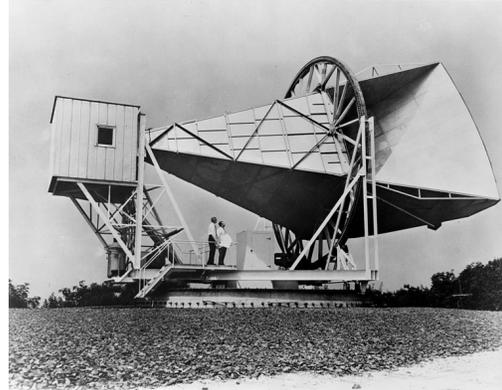
Même si le rayonnement a été émis par un corps chaud à près de 3000 K, l'expansion a étiré les longueurs d'onde et nous donnera l'impression qu'il y a un mur opaque à 2,7255 K tout autour de nous à 45,7 milliards d'années-lumière. Ce rayonnement proviendrait de toutes les directions et serait identique à celui d'un corps chaud à 2,7255 K. À ces températures, le maximum d'émission a une longueur d'onde à peine plus grande que 1 mm, à la limite entre les infrarouges et les microondes. C'est le *rayonnement de fond cosmologique*.

C'est Alpher et Hermann qui arrivèrent les premiers, en 1948, à la conclusion qu'il devait y avoir un tel rayonnement de fond cosmologique si l'univers avait eu, il y a longtemps, une température de 3000 K. Toutefois, la remarque ne suscita pas beaucoup de réactions à l'époque et elle tomba dans l'oubli.

## La découverte du rayonnement

Dès 1959, aux laboratoires Bell au New Jersey, on étudie la possibilité de communiquer avec des satellites en utilisant les microondes. On constate alors que l'antenne à microonde capte un bruit de fond continu provenant de l'environnement. Un chercheur du laboratoire, Edward Ohm, conclut, en 1961, que ce bruit de fond devait provenir de l'atmosphère, de l'antenne et du sol.

Arno Penzias et Robert Wilson travaillent aussi aux laboratoires Bell. Ils mettent au point des capteurs ultrasensibles pour mesurer le rayonnement microonde provenant de sources radio galactiques et extragalactiques. Quand, en 1964, ils travaillent avec une grosse antenne qu'on peut voir à droite, ils constatent eux aussi qu'il y a ce bruit de fond continu. Doutant des conclusions d'Ohm, ils se lancent dans une étude plus approfondie de l'origine de ce bruit de fond.



[en.wikipedia.org/wiki/File:Horn\\_Antenna-in\\_Holmdel,\\_New\\_Jersey.jpeg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Horn_Antenna-in_Holmdel,_New_Jersey.jpeg)

Des mesures confirment qu'Ohm avait bel et bien surestimé le rayonnement en provenance du sol. Cela signifie alors qu'une partie du bruit de fond restait inexpliquée. Malgré toutes leurs hypothèses, ils ne parviennent pas à trouver la source de ce bruit de fond. Est-il dû à des orages, à de l'interférence provenant du sol, à des expériences militaires, à des bris d'équipement ou à des crottes de pigeons dans l'antenne ? Après une série de tests et d'expériences, ils doivent se rendre à l'évidence qu'ils n'arrivent pas à trouver la source de ce bruit de fond.

Pendant ce temps, Robert Dicke de l'université de Princeton (aussi au New Jersey) travaille, depuis 1961, sur une variante de la théorie de la gravitation dans laquelle la constante de gravitation  $G$  varie avec le temps (la théorie de Brans-Dicke). Cette théorie prévoit aussi que l'univers a eu un état initial chaud et dense, mais qui pourrait provenir d'un *Big Crunch* d'un univers précédent. Dicke arrive à la conclusion qu'il devrait y avoir un rayonnement de fond provenant de cet état initial. Il confie alors la mission de développer cette idée à James Peebles. Ce dernier arrive aux mêmes conclusions qu'Alpher et Hermann près de 20 ans plus tôt (Dicke et Peebles ne connaissaient pas les travaux de ces derniers).

En 1965, Penzias et Wilson entendent parler d'une conférence donnée par Peebles sur la probable existence du rayonnement cosmique. Penzias communique alors avec Dicke qui s'apprêtait à monter une expérience pour détecter le rayonnement. Il devient alors évident que Penzias et Wilson avaient découvert ce fameux rayonnement cosmique. Ils conviennent alors de publier les résultats en même temps. D'un côté, Penzias et Wilson décrivent leurs observations alors que de l'autre côté Dicke suggère que les observations s'expliquent par le rayonnement de fond cosmologique prévu par la cosmologie. D'autres observations confirment par la suite cette idée. (Penzias et Wilson ont gagné le prix Nobel de physique en 1978 et le Canadien James Peebles l'a gagné en 2019.)

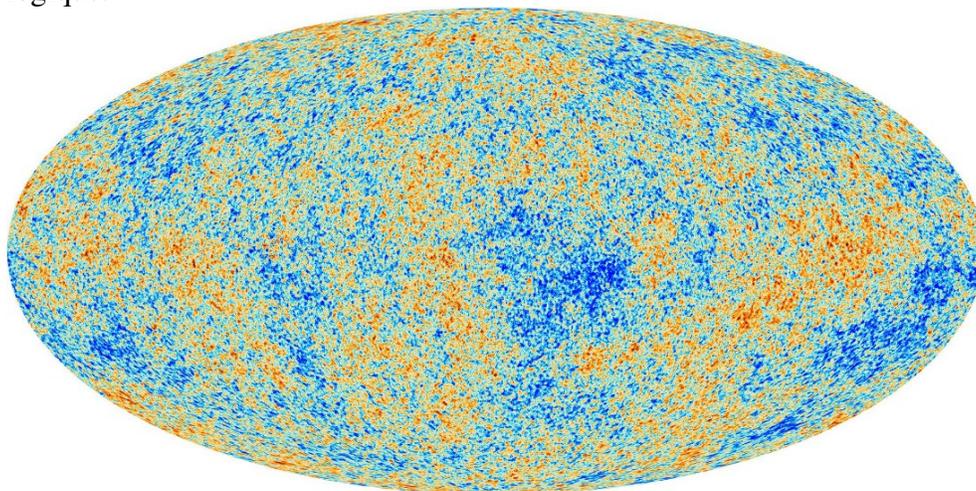
Notez que le rayonnement avait été observé auparavant, mais on n'avait pas fait le lien avec le rayonnement de fond cosmologique. Notons particulièrement les observations du français Émile Leroux en 1955 (qui propose même que le rayonnement soit d'origine extragalactique), du russe T.A. Shmaonov en 1957 (qui se rend compte seulement en 1983 de ce que ses mesures signifiaient !) et de l'américain Ed Ohm en 1962. De l'autre côté, les quelques théoriciens qui connaissaient le rayonnement n'arrivaient pas à convaincre les observateurs de chercher ce rayonnement, d'autant plus qu'ils ne savaient même pas s'il serait possible de l'observer.

On peut dire que la découverte du rayonnement changea complètement le statut de la cosmologie dans le monde scientifique. La découverte du rayonnement montrait clairement que l'univers avait été chaud et dense dans le passé. On n'avait pas seulement une preuve de l'expansion de l'univers, on avait maintenant un élément à mesurer et à étudier qui permettrait de déterminer les modèles qui peuvent véritablement décrire notre univers.

La cosmologie devenait une véritable science et le nombre de physiciens et d'astronomes qui s'intéressent à la cosmologie explose dans les années 70. (C'est seulement dans ces années-là que l'appellation Big Bang commence à s'imposer.)

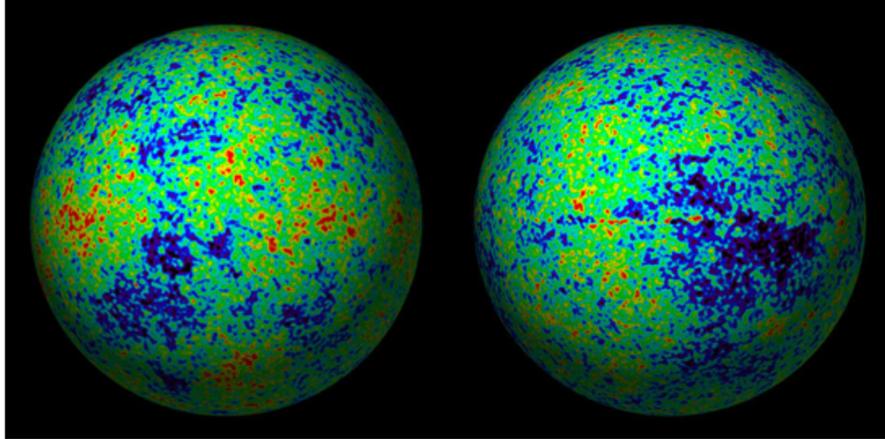
## Les variations du rayonnement

La théorie du Big Bang prévoit que ce rayonnement ne doit pas être parfaitement uniforme, qu'il doit y avoir de très légères variations du rayonnement dues à de légères variations de densité de la matière dans l'univers quand celui-ci avait une température de 3000 K. Ce sont ces légères variations de densité qui vont ensuite s'amplifier, avec la force gravitationnelle, pour former les galaxies. Cela a pris beaucoup de temps, mais on finit par découvrir ces variations, d'à peine 6 parties par million, dans le rayonnement de fond cosmologique. Voici une carte montrant les variations d'intensité du rayonnement de fond cosmologique.



[www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Planck/Planck\\_reveals\\_an\\_almost\\_perfect\\_Universe](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_reveals_an_almost_perfect_Universe)

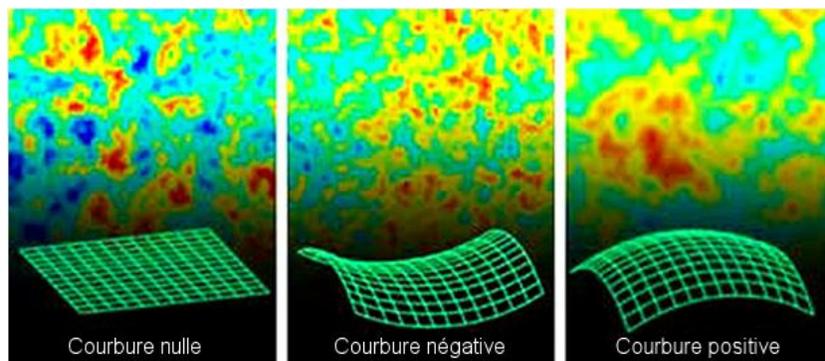
Ceci est une carte de tout le ciel qui entoure la Terre. On a une meilleure représentation si on fait effectivement une sphère avec ces données.



[www.perimeterinstitute.ca/research/research-areas/cosmology/more-cosmology](http://www.perimeterinstitute.ca/research/research-areas/cosmology/more-cosmology)

Cette représentation montre ce mur sphérique opaque qui entoure la Terre et qui limite la taille de notre univers observable. Le rayon de cette sphère est de 45,7 milliards d'années.

Une foule de renseignements peut être obtenue à partir des variations du rayonnement de fond cosmologique. Par exemple, la taille angulaire des variations dépend de la courbure de l'univers. Voici ce qu'on obtiendrait pour différente courbure.



[discovermagazine.com/2001/mar/featdark/#.Up6cgsRWwyo](http://discovermagazine.com/2001/mar/featdark/#.Up6cgsRWwyo)

C'est à partir de mesure de variations du rayonnement de fond cosmologique qu'on sait que la courbure est

$$\Omega_k = 0,0007 \pm 0,0019$$

et, selon toute vraisemblance, que notre univers est plat. C'est aussi à partir de ces variations qu'on précise l'âge de l'univers.

## 15.4 LES 4 PREMIÈRES SECONDES DE L'UNIVERS

Voyons maintenant comment a changé l'univers selon la théorie du Big Bang.

Avant de commencer, il faut se rappeler que la théorie du Big Bang ne décrit pas la naissance de l'univers, elle décrit plutôt comment évolue l'univers à partir du moment où l'univers a une certaine densité et une certaine température. Il faut donc choisir un point de

départ. Si on suppose que la relativité était toujours valide, il faut  $10^{-47}$  s (appelé *temps de Planck*) pour que l'univers passe d'un seul point ( $a = 0$ ) ayant une densité infinie à un univers ayant une densité égale à la densité de Planck. Avec les connaissances actuelles, on ne peut absolument rien connaître sur ce qui se passe dans l'univers pendant ce moment et tout ce qu'on peut entendre sur l'univers ayant une densité supérieure à la densité de Planck n'est que pure spéculation. Notre point de départ sera l'univers ayant la densité de Planck. À ce moment, le facteur d'échelle est de  $10^{-60}$ .

(Pour savoir d'où viennent les valeurs de facteur d'échelle, de température et de densité, consulter ce document : <http://physique.merici.ca/astro/bigbang.pdf>)

## **$t = 0$      $a = 10^{-60}$** **L'inflation primordiale**

Avec un tel facteur d'échelle, le diamètre de l'univers observable en ce moment n'est que de  $10^{-33}$  m. Tout ce qu'on voit dans notre univers est compacté dans cette petite sphère un milliard de milliards de fois plus petite qu'un proton !

On ne connaît pas bien cet univers, car on ne sait pas si les lois de la physique qu'on connaît sont valides dans ces conditions. Même si la densité de cet univers est inférieure à la densité de Planck, on ne sait pas si nos lois sont bonnes, car elles n'ont jamais été testées dans un tel environnement. Voici les grandes lignes de ce qu'on pense qui s'est passé dans cet univers, bien que cela reste de la spéculation pour l'instant.

On pense qu'à cette époque, l'énergie de vide dominait fortement l'univers. On parle de densité d'énergie du vide tournant autour de  $10^{76}$  kg/m<sup>3</sup>, donc vraiment beaucoup plus que l'énergie du vide actuelle qui est  $7,1 \times 10^{-27}$  kg/m<sup>3</sup>. Or, on a vu que l'énergie du vide fait accélérer l'expansion de l'univers, ce qui veut dire qu'un tel univers dominé par l'énergie du vide va très rapidement prendre de l'expansion. Cette expansion est tellement rapide qu'elle multiplie par  $10^{34}$  le rayon de ce qui est aujourd'hui l'univers observable pour le faire passer le facteur d'échelle de  $10^{-60}$  à  $10^{-26}$  en à peine  $10^{-32}$  s. C'est comme si on prenait un volume de la grosseur d'un proton et qu'on l'étirait pour qu'il ait un rayon de 1000 années-lumière en seulement  $10^{-32}$  s. C'est une expansion incroyable rapide. Cette expansion très rapide s'appelle l'*inflation primordiale*.

Cette période d'inflation est nécessaire pour amener l'univers à la densité critique. On peut commencer avec un univers ayant n'importe quelle densité, la densité de l'univers est égale à la densité critique à la fin de la période d'inflation. Pour le démontrer, utilisons

$$\frac{kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \left( \frac{\rho_{m0}}{a^3} + \rho_\Lambda \right) - H^2$$

Cette équation donne

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_\Lambda + \frac{8\pi G}{3} \frac{\rho_{m0}}{a^3} - \frac{kc^2}{a^2}$$

À mesure que  $a$  augmente, les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> termes deviennent de plus en plus petit. Quand  $a$  aura augmenté beaucoup (c'est le cas ici, car  $a$  augmente de  $10^{34}$  pendant la période d'inflation), ces termes deviendront négligeables par rapport au 1<sup>er</sup> et  $H$  sera pratiquement une constante. Le 2<sup>e</sup> terme indique aussi que la matière est extrêmement diluée à la fin de la période d'inflation et qu'elle n'a plus d'importance.

Sachant que  $H$  est une constante en fin de période d'inflation, retournons à l'équation

$$\frac{kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \left( \frac{\rho_{0m}}{a^3} + \rho_\Lambda \right) - H^2$$

pour obtenir (en enlevant la matière qui n'a plus d'importance)

$$\frac{kc^2}{a^2} = H^2 \left( \frac{8\pi G}{3H^2} \rho_\Lambda - 1 \right)$$

$$\frac{kc^2}{a^2} = H^2 \left( \frac{1}{\rho_c} \rho_\Lambda - 1 \right)$$

$$\frac{kc^2}{a^2} = H^2 (\Omega_\Lambda - 1)$$

$$kc^2 = a^2 H^2 (\Omega_\Lambda - 1)$$

Ce résultat signifie que

$$a^2 H^2 (\Omega_\Lambda - 1) = \text{constante}$$

On a dit que  $H$  était une constante à la fin de la période d'inflation. Donc, pendant que  $a$  augmente,  $\Omega_\Lambda - 1$  doit diminuer. Si  $a$  augmente énormément (c'est le cas ici),  $\Omega_\Lambda - 1$  doit diminuer énormément. En fait,  $\Omega_\Lambda - 1$  devient pratiquement nul, ce qui signifie que  $\Omega_\Lambda = 1$  et que la densité d'énergie du vide est égale à la densité critique à la fin de la période d'inflation.

Sans énergie du vide, la densité s'éloigne de la densité critique avec l'expansion. Quand l'énergie du vide domine, la densité s'en approche.

C'est ce qui expliquerait pourquoi notre univers a exactement la densité critique. Ce n'est pas une question de chance. Une période d'inflation rapide où il y a une énergie du vide amène directement l'univers à avoir la densité critique si cette inflation dure assez longtemps de sorte que le facteur d'échelle change beaucoup. Avec une inflation gonflant l'univers d'un facteur  $10^{34}$ , l'univers s'est fortement approché de la densité critique, pour arriver, en fin de compte, à la densité critique.

À la fin de la période d'inflation, la matière est tellement diluée qu'on peut dire qu'il n'y a plus de matière dans l'univers et qu'il ne reste que l'énergie du vide. Avec une densité qui change avec le cube du facteur d'échelle, la densité baisse d'un facteur  $10^{102}$  quand le facteur d'échelle est multiplié par  $10^{34}$ . C'est une énorme baisse de densité. Pendant ce temps, la densité du vide est restée constante. Il est inévitable que la densité du vide domine

très fortement à la fin de la période d'inflation, tellement qu'on peut dire qu'il ne reste que de l'énergie du vide.

Évidemment, l'univers ne peut pas rester dans cet état. On pense donc qu'au bout de  $10^{-32}$  s, il y a eu une transition de phase dans l'univers et que l'énergie de vide s'est transformée en matière.

$$E_{\text{vide}} \rightarrow E_{\text{matière}}$$

On ne connaît rien de ce processus, mais il doit exister pour que l'univers sorte de sa phase d'inflation et qu'il y ait de la matière dans l'univers.

Après la transition de phase, il ne reste que très peu d'énergie du vide (celle qu'on a aujourd'hui). On serait donc passé d'une énergie du vide de  $10^{73}$  kg/m<sup>3</sup> à une densité de  $10^{-26}$  kg/m<sup>3</sup>, une diminution d'un facteur de  $10^{99}$ .

Notez que la période d'inflation n'est peut-être pas obligatoire. Certaines théories, comme celles prévoyant un univers cyclique par exemple, permettent d'obtenir des résultats intéressants sans qu'il y ait de période d'inflation. Ces théories peuvent être une solution de rechange intéressante à celle de l'inflation parce qu'il y a encore quelques problèmes non résolus avec cette théorie (concernant notamment la façon dont la période d'inflation se termine).

$$t = 10^{-32} \text{ s} \quad a = 10^{-26} \quad \text{Température} = 10^{26} \text{ K}$$

$$\text{Densité} = 10^{73} \text{ kg/m}^3$$

## Un univers composé de matière et d'antimatière

(La densité donnée ici, et dans les sections suivantes, est la densité d'énergie, exprimée en masse équivalant à cette énergie par  $E = mc^2$ .)

À ce facteur d'échelle, le diamètre de l'univers observable actuel est de 10 m.

### La matière légèrement favorisée aux dépens de l'antimatière

À ce moment, l'énergie du vide se transforme en énergie de matière et on passe d'un univers dominé par l'énergie du vide à un univers dominé par la matière. Il y a encore un peu d'énergie du vide, mais elle sera tout à fait négligeable pour un bon bout de temps.

Dans tous les processus connus en ce moment en physique des particules, la création de matière à partir d'énergie génère toujours exactement la même quantité de matière et d'antimatière. On pourrait donc penser que la transition de phase a généré autant de matière que d'antimatière dans l'univers. Si c'était ce qui s'est passé, on pourrait avoir la moitié des galaxies composée de matière et l'autre moitié composée d'antimatière. Ce serait

d'ailleurs très difficile de déterminer si une galaxie est en matière ou en antimatière uniquement en l'observant de loin. Toutefois, on ne pense pas qu'il y ait des galaxies en antimatière parce que les collisions de galaxies sont assez fréquentes. La collision d'une galaxie en matière et d'une galaxie en antimatière serait un spectacle inoubliable. Les deux galaxies s'annihileraient mutuellement en libérant une quantité d'énergie formidable. Malgré le nombre important de collisions, aucune collision ne libère autant d'énergie, ce qui nous amène à penser que toutes les galaxies sont composées de matière et qu'il n'y en a pas qui sont composées d'antimatière. Mais alors, si la création de matière génère normalement autant de matière et d'antimatière, où est donc passée toute l'antimatière ?

On pense que la matière fut favorisée aux dépens de l'antimatière à cette époque. Il y a peut-être eu un peu plus de matière que d'antimatière qui a été créée lors de la transition de phase créant la matière et l'antimatière à partir de l'énergie du vide ou peut-être qu'il y a eu un autre processus inconnu qui a agi plus tard et qui a transformé un peu d'antimatière en matière. Pour l'instant, on a aucune idée comment cela peut se produire, mais cela doit se produire pendant que le facteur d'échelle est entre  $10^{-26}$  et  $10^{-18}$ . Cette valeur de  $10^{-18}$  correspond à la limite des tests expérimentaux faits dans les accélérateurs de particules. Si le processus transformant l'antimatière en matière se produisant avec un facteur d'échelle supérieur à  $10^{-18}$ , on pourrait observer ce mécanisme à l'œuvre dans les accélérateurs de particules. Il faut donc que la proportion de matière et d'antimatière soit fixée quand le facteur d'échelle atteint  $10^{-18}$ . Peu importe la manière dont ça s'est fait, il faut qu'il y ait à peine un peu plus de matière que d'antimatière quand on arrive à  $a = 10^{-18}$ .

La matière et l'antimatière coexistent dans ce jeune univers chaud et très dense. Toutefois, on va voir que l'antimatière et la matière vont s'annihiler quand la température va baisser. Lors de cette annihilation, toute l'antimatière et presque toute la matière vont disparaître. S'il reste de la matière aujourd'hui, c'est qu'il y avait un peu plus de matière que d'antimatière avant que l'annihilation ne commence. Le déséquilibre n'était pas bien grand. On parle d'un ratio de 3 milliards + 1 particules de matière pour 3 milliards de particules d'antimatière. Après l'annihilation, il ne restera que ce petit excès de 1 particule de matière sur 6 milliards de particules. Ce petit excès qui est resté correspond à toute la matière dans notre univers actuel.

### Particules présentes à ce moment

À ce moment, l'univers n'est pas composé de protons et de neutrons. La température de l'univers est si grande qu'aucune structure ne peut survivre. La matière chaude émet un rayonnement dont l'énergie est si grande que les photons de ce rayonnement ont assez d'énergie pour détruire n'importe quelle structure. Ainsi, les protons et les neutrons se retrouvent décomposés en quarks.

On retrouve donc uniquement ce qu'on considère comme étant les particules fondamentales. Ces particules sont les suivantes.

#### Quarks

1<sup>re</sup> famille :    Quark up (*u*)                      Quark down (*d*)

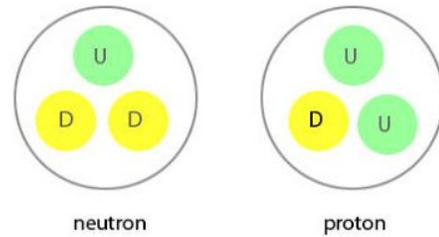
2<sup>e</sup> famille : Quark strange (*s*)      Quark charm (*c*)  
 3<sup>e</sup> famille : Quark bottom (*b*)      Quark top (*t*)

Lepton

1<sup>re</sup> famille : électrons (*e*<sup>-</sup>)      neutrino électronique *ν<sub>e</sub>*  
 2<sup>e</sup> famille : muons (*μ*<sup>-</sup>)      neutrino muonique *ν<sub>μ</sub>*  
 3<sup>e</sup> famille : tauon (*τ*<sup>-</sup>)      neutrino tauique *ν<sub>τ</sub>*

Toutes ces particules ont aussi des antiparticules, qu'on note en plaçant une ligne au-dessus du symbole. Par exemple, l'antiparticule du quark *u* est l'antiquark up et est noté *ū*. Dans le cas des leptons *e*<sup>-</sup>, *μ*<sup>-</sup> et *τ*<sup>-</sup>, on va plutôt inverser le signe à l'exposant et les noter *e*<sup>+</sup> (antiélectron), *μ*<sup>+</sup> (antimuon) et *τ*<sup>+</sup> (antitauon).

Les protons et les neutrons sont composés de trois quarks de la première famille. Le proton est composé des quarks *udd* et le neutron est composé des quarks *uud*.

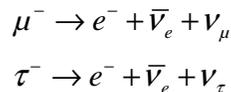


L'antiproton est composé des trois antiquarks *ūdd̄* et l'antineutron est composé des trois antiquarks *ūūd̄*.

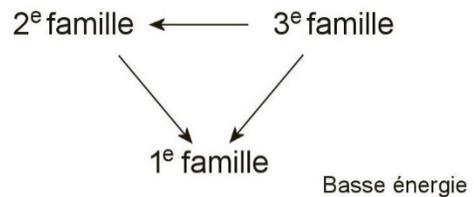
[sciexplorer.blogspot.ca/2012/10/atoms-part-1-how-atoms-are-made.html](http://sciexplorer.blogspot.ca/2012/10/atoms-part-1-how-atoms-are-made.html)

Les transformations d'une famille à l'autre

Dans les deux groupes, les particules d'une famille peuvent se transformer en une particule d'une autre famille. Par exemple, les muons et les tauons peuvent se transformer en électrons par les désintégrations suivantes.



Cette transformation peut se faire à basse énergie parce qu'elle libère de l'énergie puisque la masse est inférieure après la transformation. Comme les particules de la troisième famille sont plus lourdes que celles de la deuxième famille qui sont elles-mêmes plus lourdes que celles de la première famille, on peut avoir ces transformations à basse température.



Ces transformations font en sorte qu'il n'y a pratiquement pas de muons et de tauons autour de nous aujourd'hui. Dans l'univers actuel, ces particules se transforment assez rapidement en électrons. Il n'y a pas de quarks *s*, *c*, *b* et *t* non plus parce que ces particules se désintègrent rapidement en quarks *u* et *d*.

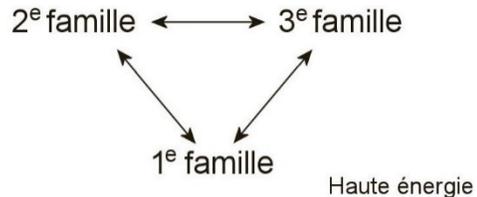
Les transformations inverses de particules de la première famille en particule d'autres familles

$$e^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$

$$e^- \rightarrow \tau^- + \bar{\nu}_\tau + \nu_e$$

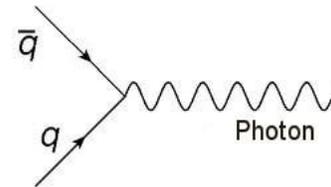
sont également possibles, mais elles demandent de l'énergie puisque la masse augmente lors de ces transformations. Pour qu'elles se produisent, on doit faire des collisions à haute énergie. Dans ce cas, une partie de l'énergie cinétique est utilisée pour faire la réaction. Cela est possible dans un accélérateur de particules et c'est d'ailleurs ainsi qu'on a découvert une bonne partie de ces particules des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> familles. Elles pourraient aussi se produire spontanément dans un environnement très chaud. À haute température, les particules ont beaucoup d'énergie cinétique et cette grande énergie cinétique pourra fournir l'énergie nécessaire pour que la réaction se produise.

Dans le très jeune univers, la température est suffisamment grande pour qu'on puisse avoir des transformations vers des familles plus lourdes. Cela fait en sorte que toutes les particules de toutes les familles existent dans cet univers.

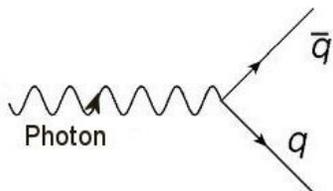


Pourquoi la matière et l'antimatière ne s'annihilent-elles pas immédiatement ?

Dans cet univers, nous avons de la matière et de l'antimatière qui se rencontrent très souvent. Lors de la rencontre d'une particule et de son antiparticule, toute l'énergie passe sous forme de photon lors de l'annihilation.



[www.quantumdiaries.org/tag/qcd/](http://www.quantumdiaries.org/tag/qcd/)



Mais à haute température, les photons ont assez d'énergie pour que le processus inverse puisse se produire.

Avec les deux processus se produisant simultanément, on a un équilibre entre l'annihilation entre les particules et les antiparticules et la création de paires particule-antiparticule. Par exemple, pour le quark *u* on a

$$u + \bar{u} \rightleftharpoons \text{photons}$$

Il est donc vrai que les particules et les antiparticules s'annihilent, mais cette annihilation est compensée par la création de nouvelles particules et antiparticules.

Composantes présentes à la fin de cette phase

À la fin de cette phase, les particules suivantes sont présentes dans l'univers

Quarks	Antiquarks	Leptons	Antileptons	Photons
$u$	$\bar{u}$	$e^-$	$e^+$	Photons
$d$	$\bar{d}$	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	
$s$	$\bar{s}$	$\mu^-$	$\mu^+$	
$c$	$\bar{c}$	$\nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu$	
$b$	$\bar{b}$	$\tau^-$	$\tau^+$	
$t$	$\bar{t}$	$\nu_\tau$	$\bar{\nu}_\tau$	

Il y a peut-être aussi de la matière sombre. (On ne sait pas à quel moment elle apparaît.)

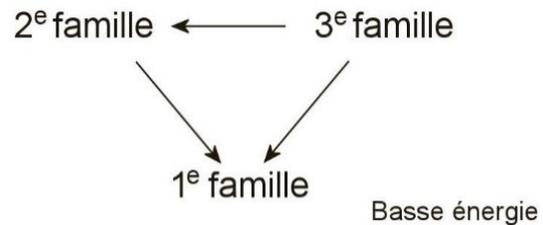
$t = 10^{-10} \text{ s}$        $a = 10^{-15}$       **Température =  $10^{15} \text{ K}$**   
**Densité =  $10^{29} \text{ kg/m}^3$**

## La perte des particules des familles 2 et 3

À ce facteur d'échelle, le diamètre de l'univers observable actuel est d'environ 10 UA.

Il est important de noter qu'on est maintenant en terrain connu. Grâce aux expériences dans des accélérateurs de particules, on connaît les lois de la physique jusqu'à des énergies équivalentes à des températures de  $10^{18} \text{ K}$ . Il n'y a donc plus de spéculations dans les étapes du Big Bang qui suivront.

La température est maintenant assez basse pour que les transformations des particules et particules de familles plus lourdes deviennent impossibles. Les seules transformations possibles sont maintenant les transformations vers les familles plus légères, qui aboutissent toutes à la famille 1.



### Composantes présentes à la fin de cette phase

Les particules des familles 2 et 3 disparaissent donc assez rapidement. À la fin de cette phase, les particules suivantes sont présentes dans l'univers.

Quarks	Antiquarks	Leptons	Antileptons	Photons
$u$	$\bar{u}$	$e^-$	$e^+$	Photons
$d$	$\bar{d}$	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	

Il y a peut-être aussi de la matière sombre. (On ne sait pas à quel moment elle apparaît.)

$$t = 10^{-4} \text{ s} \quad a = 10^{-12} \quad \text{Température} = 10^{12} \text{ K}$$

$$\text{Densité} = 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

## La création des baryons

À ce facteur d'échelle, le diamètre de l'univers observable actuel est d'environ 0,1 al.

### La formation de baryons

Avec la densité qui baisse, les quarks commencent à être un peu loin les uns des autres. Toutefois, la force nucléaire entre les quarks ne permet pas qu'un quark soit trop éloigné des autres quarks et ces derniers doivent se regrouper pour former des particules. On peut premièrement former des mésons, qui regroupent un quark et un antiquark. Ces particules se sont formées, mais elles ne vivent pas bien longtemps puisque les mésons les plus stables ont une demi-vie de l'ordre de  $10^{-8}$  s. Les quarks peuvent aussi se regrouper en groupe de 3 pour former des *baryons* qui sont beaucoup plus stables. (On peut aussi former un groupe de 2 quarks et de 2 antiquarks pour former un *tétraquark* ou encore former un groupe de 4 quarks et 1 antiquark pour obtenir un *pentaquark*. Ces configurations plutôt rares furent observées pour la première fois en 2014 pour le tétraquark et en 2015 pour le pentaquark.)

À  $t = 10^{-4}$  s, on arrive donc au moment où la densité baisse suffisamment pour que les quarks commencent à être un peu trop loin les uns des autres. Les quarks finissent par se regrouper alors en groupes de trois pour former les particules suivantes :

Proton :  $udd$

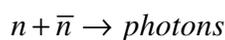
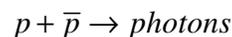
Antiprotons ( $\bar{p}$ ) :  $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$

Neutron :  $uud$

Antineutron ( $\bar{n}$ ) :  $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$

### Une première vague d'annihilation

Dès qu'elles sont créées, ces particules et antiparticules vont s'annihiler. À ces températures, les photons avaient assez d'énergie pour créer des paires de quark et d'antiquark, mais ils n'ont pas assez d'énergie pour créer des paires de baryon et d'antibaryon, qui sont des particules beaucoup plus lourdes et dont la création demande beaucoup plus d'énergie. Comme il n'y a pas de création de baryons et d'antibaryons, mais qu'il y a encore de l'annihilation, les baryons nouvellement créés disparaissent assez rapidement selon les réactions suivantes.



À la fin de cette vague d'annihilation, il ne reste plus d'antibaryons et il ne reste que le très léger excès de baryons par rapport aux antibaryons. Pour chaque 3 milliards + 1 baryons et les 3 milliards d'antibaryons, il ne reste qu'un seul baryon, qui peut être un proton ou un neutron.

Il y a donc une baisse drastique de la densité de matière dans l'univers à ce moment au profit des photons. La densité d'énergie reste la même, mais cette énergie est maintenant sous forme de photons. Lentement, la matière reprendra le dessus parce que la densité d'énergie des photons diminue plus rapidement (avec  $a^4$ ) que celle de la matière (avec  $a^3$ ) avec le facteur d'échelle puisque l'expansion étire la longueur d'onde de la lumière et lui fait perdre de l'énergie.

### Composantes présentes à la fin de cette phase

À la fin de cette phase, les particules suivantes sont présentes dans l'univers.

Baryons	Leptons	Antileptons	Photons
$p^+$	$e^-$	$e^+$	Photons
$n^0$	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	

On note qu'il reste encore de l'antimatière (les antiélectrons). Les photons ont encore assez d'énergie pour recréer constamment des paires d'électron-antiélectron puisque ces particules sont beaucoup moins massives que les protons et les neutrons.

Il y a peut-être aussi de la matière sombre. (On ne sait pas à quel moment elle apparaît.) C'est la composition de l'univers à la fin de sa première seconde de vie.

**$t = 1 \text{ s}$        $a = 10^{-10}$       Température =  $10^{10} \text{ K}$**   
**Densité =  $10^9 \text{ kg/m}^3$**

## Le découplage des neutrinos

À ce facteur d'échelle, le diamètre de l'univers observable actuel est d'environ 10 al.

Jusqu'ici, les neutrinos interagissaient avec la matière. Ils interagissent avec les quarks et les transforment selon les équations

$$\nu + d \rightarrow u + e^-$$

$$\bar{\nu} + u \rightarrow d + e^+$$

Si cette transformation se fait à l'intérieur des protons et des neutrons, on a

$$\nu + n^0 \rightarrow p^+ + e^-$$

$$\bar{\nu} + p^+ \rightarrow n^0 + e^+$$

Quand la température baisse en deçà de 10 milliards de kelvins, les neutrinos n'ont plus assez d'énergie pour transformer les quarks. À partir de ce moment, la matière et les neutrinos n'interagissent plus du tout ensemble. Ils sont tous les deux dans l'univers, mais s'ignorent complètement puisqu'aucune interaction n'est possible entre les deux. Quand

deux composantes de l'univers vivent ainsi dans l'univers en s'ignorant complètement l'une et l'autre, on dit qu'il y a *découplage*.

Depuis que l'univers a un âge de 1 seconde, les neutrinos formés dans l'univers très jeune sont découplés du reste de la matière de l'univers et mènent une existence indépendante. Ils sont encore là aujourd'hui et ont une densité de 450 neutrinos par  $\text{cm}^3$  et une énergie moyenne de  $2,4 \times 10^{-4}$  eV. Vous êtes continuellement traversé par cette mer de neutrinos sans qu'il y ait le moindre effet sur vous. Sachez également qu'on n'a jamais détecté ces neutrinos. Comment pourrait-on les détecter s'ils n'interagissent plus avec la matière ?

$$t = 4 \text{ s} \quad a = 2 \times 10^{-10} \quad \text{Température} = 4 \times 10^9 \text{ K}$$

$$\text{Densité} = 3 \times 10^7 \text{ kg/m}^3$$

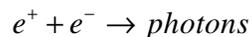
## L'annihilation entre les électrons et les antiélectrons

À ce facteur d'échelle, le diamètre de l'univers observable actuel est d'environ 20 al.

À des températures supérieures à 5 milliards de kelvins, les photons avaient assez d'énergie pour créer des paires d'électron et d'antiélectron. Il y avait alors équilibre entre la création de paires électron-antiélectron et l'annihilation de paires électron-antiélectron.



Quand la température baisse en deçà de 5 milliards de kelvins, les photons n'ont plus assez d'énergie pour créer des paires électron-antiélectron et il ne reste que de l'annihilation. Notre équation devient donc



Les électrons et les antiélectrons vont donc s'annihiler mutuellement, tout comme l'ont fait les protons et les neutrons plus tôt. À la fin de cette vague d'annihilation, il ne reste plus d'antiélectrons et il reste que le très léger excès d'électrons qu'on avait par rapport aux antiélectrons. Sur les 3 milliards + 1 d'électrons et les 3 milliards d'antiélectrons, il ne reste qu'un seul électron.

### Composantes présentes à la fin de cette phase

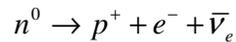
À la fin de cette phase, les particules suivantes sont présentes dans l'univers.

Baryons	Leptons	Antileptons	Photons	Matière sombre
$p^+$	$e^-$	$e^+$	Photons	Composition inconnue
$n^0$	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$		

(Les neutrinos sont découplés du reste de la matière.)

On est certain que la matière sombre est présente à la fin de cette phase. Nous verrons pourquoi plus loin.

Et voilà, la matière primordiale (proton, neutron, électron) est en place. Le seul changement qu'il y a à ce moment est la lente désintégration des neutrons en protons par la réaction



Cette désintégration fait lentement baisser le nombre de neutrons par rapport au nombre de protons.

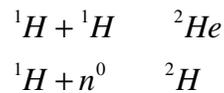
## 15.5 LA NUCLÉOSYNTÈSE

**$t = 100 \text{ s}$        $a = 10^{-9}$       **Température =  $10^9 \text{ K}$**   
**Densité =  $10^5 \text{ kg/m}^3$****

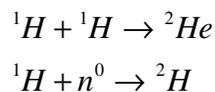
À ce facteur d'échelle, le diamètre de l'univers observable actuel est d'environ 100 al.

### Les réactions de fusion

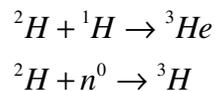
La densité et la température qu'on avait pendant les 100 premières secondes de la vie de l'univers étaient amplement suffisantes pour qu'il puisse y avoir de la fusion nucléaire entre les protons. Toutefois, les photons présents dans l'univers avaient assez d'énergie pour détruire ces noyaux en séparant les protons. On avait alors les réactions suivantes.



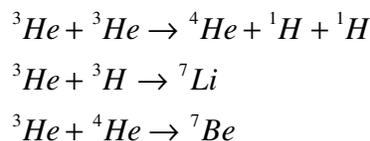
À partir de  $t = 100 \text{ s}$ , les photons n'ont plus assez d'énergie pour détruire les noyaux atomiques et les réactions deviennent



Quand les produits de ces réactions deviennent assez abondants, on peut aussi avoir les réactions suivantes.



Suivent ensuite les réactions suivantes.



Les réactions nucléaires n'auront toutefois pas le temps d'aller beaucoup plus loin que cela. La période de fusion nucléaire s'arrête après seulement quelques dizaines de secondes parce que l'expansion de l'univers fait diminuer la densité et la température, si bien que les fusions ne sont plus possibles. De toute façon, il aurait été difficile de fusionner des noyaux pour obtenir des éléments plus lourds. Comme les noyaux lourds ont une charge électrique plus grande, il faut plus d'énergie cinétique pour que ces noyaux puissent s'approcher suffisamment l'un de l'autre et fusionner. Toutefois, l'expansion de l'univers fait refroidir l'univers, ce qui diminue la température et donc l'énergie cinétique moyenne des noyaux. L'univers est déjà trop froid pour fusionner des éléments lourds quand la fusion de l'hydrogène commence.

Après la période de fusion, nous avons les noyaux et particules suivants dans l'univers.

Noyaux atomiques	Leptons	Antileptons	Photons	Matière sombre
$^1H$ $^2H$ $^3H$	$e^-$	$e^+$	Photons	Composition inconnue
$^2He$ $^3He$ $^4He$	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$		
$^7Li$				
$^7Be$				

### La proportion des éléments

On peut prévoir théoriquement la proportion des éléments produits lors de cette phase de fusion. Principalement, on a fusionné de l'hydrogène en hélium pour obtenir le résultat suivant.

90 % des atomes sont de l'hydrogène 1 et 10 % des atomes sont de l'hélium 4.

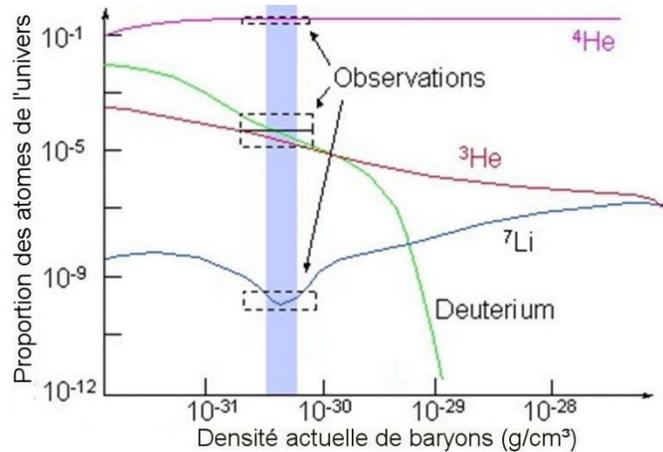
71 % de la masse est de l'hydrogène 1 et 29 % de la masse est de l'hélium 4.

Ce sera essentiellement la composition de la matière qui formera les premières étoiles. En fait, la composition de la matière n'a pas énormément changé depuis ce temps, puisque c'est pratiquement la même composition que celle du Soleil. Évidemment, il y a des éléments plus lourds qui se sont ajoutés depuis, comme le carbone et l'oxygène. Ces éléments étaient totalement absents quand la période de fusion de l'univers s'est terminée. Ils se sont formés dans les étoiles pour ensuite se repandre dans tout l'univers lors de la mort des étoiles. La proportion de ces éléments lourds augmentera donc lentement pendant la vie de l'univers à partir du moment où les étoiles commenceront à se former. Pour l'instant, on est encore loin de cette étape.

La proportion des autres isotopes et éléments produits lors de la période de fusion est assez petite, mais ces isotopes sont importants. Les réactions de fusion dans les étoiles ne génèrent pas d'hydrogène 2, d'hélium 3, de lithium ou de béryllium. Les atomes de ces éléments proviennent donc nécessairement de cette époque de fusion et peuvent être un bon test de la validité de la théorie du Big Bang. En effet, la proportion de ces éléments

dépend des conditions présentes dans l'univers quand il y a eu de la fusion. Le graphique de droite montre la proportion des éléments formés en fonction de la densité de baryons (protons et neutrons).

(La densité n'est pas celle de l'univers au moment de la fusion, mais celle qu'on a aujourd'hui, qui est calculée à partir de la densité lors de la période de fusion.)



On remarque que la proportion des atomes de l'univers qui se retrouve sous forme d'hélium 4 ne dépend pas beaucoup des conditions présentes lors de la période de fusion. Peu importe la densité de baryon à ce moment, on a pratiquement toujours la même proportion d'hélium 4 à la fin de la période de fusion. Cette proportion est essentiellement toujours la même simplement parce que les réactions de fusion menant à la formation de l'hélium se continuent jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de neutrons libres. C'est donc la proportion de neutrons par rapport aux protons qui détermine la quantité d'hélium 4 formé, plutôt que la densité de l'univers.

On voit cependant que les proportions d'hydrogène 2 (deutérium), d'hélium 3 et de lithium 7 changent un peu plus avec la densité baryonique. Comme la quantité de ces éléments n'a pas changé depuis la période de fusion, on peut trouver la densité de baryons de l'univers lors de la période de fusion en déterminant la proportion de ces éléments dans l'univers actuel.

On voit que les proportions observées pointent toutes vers une densité de baryons qui serait aujourd'hui aux environs de  $4,2 \times 10^{-31} \text{ g/cm}^3 = 4,2 \times 10^{-28} \text{ kg/m}^3$ .

### Encore la matière sombre

Le modèle actuel nous dit que l'univers a exactement la densité critique

$$\rho_{\text{tot}} = 8,53 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 5,10 \frac{m_p}{\text{m}^3}$$

68,5 % de cette densité est formée par l'énergie du vide et 31,5 % provient de la densité de matière

$$\rho_{\text{vide}} = 5,84 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 3,49 \frac{m_p}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{matière}} = 2,69 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,61 \frac{m_p}{\text{m}^3}$$

Or, la densité de matière baryonique n'est que de

$$\rho_{\text{baryon}} = 0,42 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,25 \frac{m_p}{\text{m}^3}$$

Cela veut dire que la proportion de matière baryonique par rapport à toute la matière dans l'univers est

$$\frac{0,25 \frac{m_p}{m^3}}{1,61 \frac{m_p}{m^3}} = 0,16$$

La matière baryonique ne constitue donc que 16 % de la matière dans l'univers. N'oubliez pas que la matière baryonique est la matière constituée de protons, de neutrons et, même si ce ne sont pas des baryons, d'électrons. Cette matière baryonique est donc la matière ordinaire qui compose tout ce qu'on considère normalement comme étant de la matière. La théorie du Big Bang vient alors nous préciser que 84 % de la matière présente dans l'univers n'est pas de la matière ordinaire. On appelle ce type de matière de la *matière exotique*.

Cette matière ne pouvant sûrement pas former d'étoiles, elle doit faire partie de la matière sombre de l'univers. On arrive donc à la conclusion suivante.

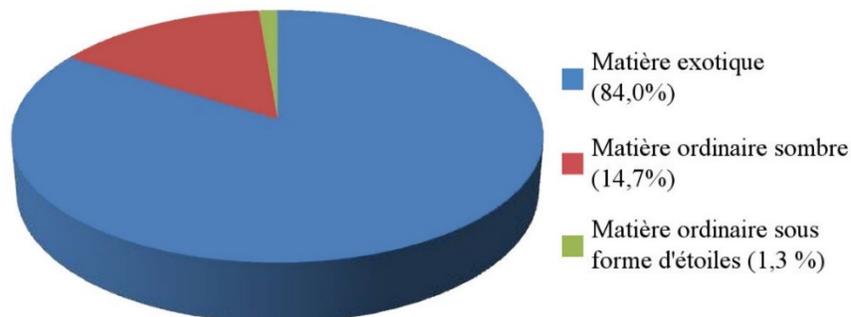
### Deuxième preuve de l'existence de la matière sombre

Il doit y avoir de la matière sombre si on veut que la proportion des éléments primordiaux calculée avec la théorie du Big Bang soit en accord avec les observations.

**(ou les lois de la gravitation sont fausses.)**

(Rappelons-nous qu'on étudie la possibilité de modifier la gravitation en ce moment. Une nouvelle version de la gravitation pourrait changer cette conclusion.)

Faisons un petit bilan de la matière dans l'univers. Rappelons-nous, pour commencer, que le rapport entre la masse et la luminosité des étoiles est, en moyenne, de  $4 M_{\odot}/L_{\odot}$  alors que ce rapport mesuré dans les amas de galaxies est aux environs de  $300 M_{\odot}/L_{\odot}$ , soit 75 fois plus grand. Cela voudrait dire que seulement  $1/75 = 1,3 \%$  de la masse de l'univers se retrouve dans les étoiles pour former la « matière visible ». On a donc la situation suivante pour la matière dans l'univers.



On peut donc préciser un peu plus la nature de la matière sombre qui forme 98,7 % de la matière de l'univers.

14,7 % de la matière est constituée de matière ordinaire. Cette partie de la matière sombre pourrait donc être du gaz, quoiqu'on estime que la masse du gaz dans un amas de galaxies est à peu près égale à la masse des étoiles. Ce pourrait être des planètes, des naines brunes ou des étoiles à neutrons.

84 % de la matière ne peut pas être constituée de matière ordinaire. Ce ne peut donc pas être des planètes, des naines brunes, du gaz ou des étoiles à neutrons. On sait déjà qu'une très petite partie de cette matière sombre est composée de neutrinos (densité inférieure à  $0,0015 m_p/m^3$ , ce qui représente environ 1,5 % de la matière sombre) et de photons (densité équivalente à  $0,00027 m_p/m^3$ , soit à peine 0,018 % de la matière sombre). On ne sait pas de quoi est composée le reste de la matière sombre, mais il y a quelques hypothèses. En voici quelques-unes.

- 1) Des théories prévoient l'existence de particule qu'on appelle des *wimps* (pour *weakly interacting massive particles*) et qui, comme les neutrinos, interagissent très peu avec la matière. Parmi toutes ces *wimps* prévues, il y a des neutrinos stériles (des neutrinos qui n'interagissent pas du tout avec la matière).
- 2) Le neutralino est probablement la particule la plus prometteuse. Cette particule est la plus légère de toutes les particules prévues par la supersymétrie, une théorie proposée en physique des particules. Bien qu'on ne puisse pas détecter les neutralinos, on espère détecter les paires d'électron-antiélectron qui devraient apparaître lors de l'annihilation de neutralinos.
- 3) D'autres théories prévoient l'existence de particules appelées *axions* pour expliquer pourquoi certaines réactions brisant des symétries ne se produisent pas. Ces axions pourraient être la matière sombre.
- 4) Il y a même des théories qui proposent que la matière sombre soit composée de particules qui ont accès à des dimensions supplémentaires.

Malgré tous les efforts déployés, on n'a jamais détecté ces particules hypothétiques et leur existence reste une spéculation pour l'instant. Peut-être qu'un jour on détectera une ou plusieurs de ces particules et qu'on découvrira qu'elles constituent une partie importante de la matière sombre exotique, mais pour l'instant ce ne sont que des hypothèses.

Les trous noirs font partie des deux catégories (matière ordinaire et exotique) puisqu'ils peuvent se former à partir de ces 2 types de matière. Une fois que la matière se ramasse dans un trou noir, elle perd son identité et on ne sait plus si elle était initialement de la matière ordinaire ou de la matière exotique. Les trous noirs forment sans doute une partie de la matière sombre, mais peu d'astrophysiciens pensent que le pourcentage de matière sombre composée de trous noirs doit être très important.

## 15.6 FORMATION DES ATOMES

Après quelques minutes de vie, l'univers a essentiellement la composition suivante.

Noyaux atomiques	Leptons	Antileptons	Photons	Matière sombre
${}^1H$	$e^-$	$e^+$	Photons	Composition inconnue
${}^4He$	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$		

(Ici, nous avons négligé l'existence des isotopes peu abondants dans l'univers pour ne garder que les deux principaux : l'hydrogène 1 (90 % des noyaux atomiques) et l'hélium 4 (10 % des noyaux atomiques).)

Quand la température est trop élevée, les noyaux atomiques et les électrons ne forment pas d'atomes stables. Il y a bien quelques électrons qui sont capturés par des noyaux pour former des atomes, mais la température est encore trop élevée pour que l'électron puisse rester bien longtemps en place. Assez rapidement, une collision ou un photon va donner assez d'énergie à l'électron pour ioniser à nouveau l'atome. On a donc la situation suivante.



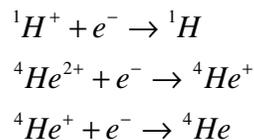
Tant que la température reste supérieure à environ 3000 K, le gaz reste ionisé et demeure sous forme de plasma. Puisqu'un gaz ionisé interagit beaucoup avec la lumière, l'univers demeure très opaque.

Il faut attendre pas mal longtemps avant que la température baisse suffisamment pour former les atomes.

**$t = 371\,800$  ans       $a = 1/1089,9$       Température = 3000 K**  
**Densité =  $10^{-17}$  kg/m<sup>3</sup>**

À ce facteur d'échelle, le diamètre de l'univers observable actuel est d'environ 100 millions d'années-lumière.

Quand l'univers a 371 800 ans, les photons n'ont plus assez d'énergie pour ioniser les atomes. Les électrons et les noyaux atomiques vont donc se regrouper pour former des atomes (qui n'ont pas de charge électrique).



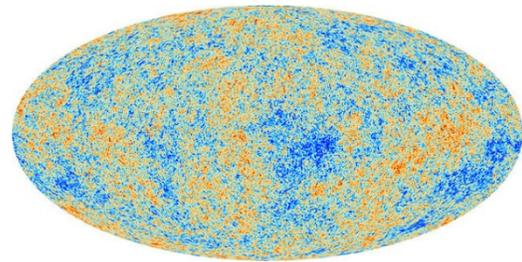
À la fin de ce processus, la composition de l'univers est

Atomes	Neutrinos (découplés)	Photons (découplés)	Matière sombre
${}^1H$	$\nu_e$	Photons	Composition inconnue
${}^4He$	$\bar{\nu}_e$		

On appelle ce changement *le découplage des photons du rayonnement de fond cosmologique*. Puisqu'il n'y a plus de charges électriques libres, le gaz devient transparent. Les photons provenant du rayonnement thermique de l'univers n'interagissent plus avec les atomes. Comme il n'y a plus d'interaction entre les atomes et les photons, on dit qu'il y a découplage entre la matière et les photons. Les photons et la matière vivent alors tous les deux dans l'univers en interagissant très peu l'un avec l'autre. Ces photons sont encore là aujourd'hui et ont une densité de 411 photons par  $\text{cm}^3$ . Ce sont ces photons qu'on détecte quand on observe le rayonnement de fond cosmologique. Notez que la densité d'énergie de ces photons primordiaux est environ 10 fois plus grande que la densité moyenne d'énergie des photons provenant de toutes les étoiles ayant existé depuis la naissance de l'univers.

L'univers devient donc transparent à ce moment. On peut donc voir dans l'univers jusqu'à ce qu'on regarde tellement loin qu'on voit l'univers tel qu'il était quand il avait un âge de 371 800 ans. Impossible de voir avant ce moment, car l'univers était opaque. On tombe sur un mur opaque qui nous montre à quoi ressemblait l'univers quand il avait 371 800 ans.

À cette époque, l'univers était très uniforme. Les variations d'intensité du rayonnement montrées sur cette figure sont fortement amplifiées puisque les variations sont de l'ordre d'à peine 0,0006 %.



## 15.7 LA FORMATION DES GALAXIES ET DES ÉTOILES

Il n'y a pas d'étoiles dans l'univers quand il est âgé de 371 800 ans. On a alors un univers très uniforme dans lequel la grande température du gaz empêche la gravitation de former des étoiles. Avec la température qui baisse continuellement, la gravitation pourra commencer son œuvre et former des étoiles et des galaxies.

On a simulé la formation des galaxies sur ordinateur pour tomber sur un petit problème : il faut beaucoup trop de temps pour que les galaxies et les étoiles se forment si on suppose que l'univers est composé uniquement de matière ordinaire avec des variations de densité aussi faible que 0,0006 % quand l'univers a 371 800 ans. Les étoiles prendraient plusieurs milliards d'années à se former, alors qu'on détecte des galaxies ayant un décalage de  $z = 14,3$ . Cette valeur signifie que ces galaxies étaient déjà formées quand le facteur d'échelle était de  $1/15,3$ , ce qui correspond à un âge de l'univers de

$$a = \left( 0,678 \cdot \sinh \left( \frac{t}{11,69Ga} \right) \right)^{\frac{2}{3}}$$

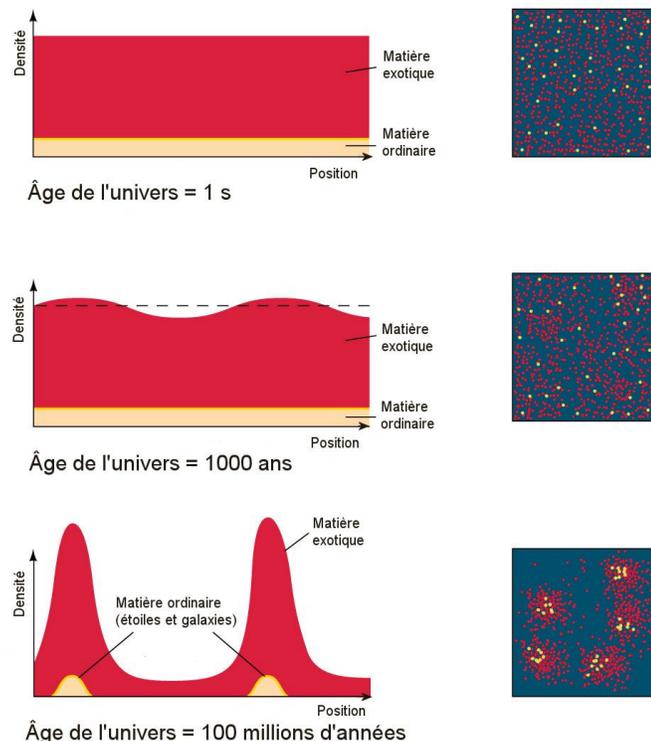
$$\frac{1}{15,3} = \left( 0,678 \cdot \sinh \left( \frac{t}{11,69Ga} \right) \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$t = 0,288Ga$$

On sait donc que les étoiles étaient déjà présentes quand l'univers avait environ 300 millions d'années. En fait, on estime que les premières étoiles se sont formées quand l'univers avait environ 100 millions. Il faut donc que les étoiles se forment beaucoup plus rapidement que ce que montrent les simulations dans lesquelles on suppose qu'il n'y a que de la matière ordinaire.

Vous vous doutez peut-être déjà de la solution de ce problème. Il n'y a pas que de la matière ordinaire dans l'univers, il y a aussi de la matière exotique. En ajoutant de la matière exotique aux simulations numériques, on parvient à obtenir des formations d'étoiles beaucoup plus rapides. Pour y arriver, il faut supposer que la matière exotique interagit peu avec la matière et les photons, ce qui est sûrement vrai puisqu'on ne parvient pas à la détecter. Cela permet à la matière exotique de ne pas être réchauffée par les photons et la matière (qui gagnent de l'énergie avec des annihilations et des fusions nucléaires par exemple). On a alors une matière sombre froide qui peut commencer à se concentrer par sa propre gravitation avant que la matière ne le fasse. C'est aussi pour cela que notre modèle actuel s'appelle  $\Lambda$ cdm, où cdm signifie *cold dark matter*. Ainsi, à l'âge de 371 800 ans, la répartition de matière ordinaire est uniforme, alors que la répartition de matière exotique l'est beaucoup moins puisqu'elle a déjà commencé à former des zones beaucoup plus denses. Quand la matière ordinaire se refroidira, elle sera rapidement entraînée à son tour vers les zones plus denses de la matière exotique, ce qui accélérera beaucoup la formation des étoiles. C'est ce qu'on peut voir sur la figure suivante.

Quand l'univers a seulement 1 seconde, la température est telle que la matière exotique et la matière ordinaire sont très uniformément réparties dans l'univers, il n'y a pas vraiment de variation de densité en fonction de la position. À un âge de 1000 ans, l'interaction entre la lumière et la matière ordinaire garde cette dernière uniformément répartie. Par contre, la lumière n'influence pas la matière exotique et celle-ci a déjà commencé à former des zones où la densité est plus grande. À un âge de 100 millions, la matière a rejoint la matière exotique dans les zones plus denses, attirée par la force de gravitation exercée par ces zones plus denses. Là, la matière ordinaire formera des étoiles et des galaxies.



[physics.uoregon.edu/~jimbrau/astr123/notes/chapter27.html](http://physics.uoregon.edu/~jimbrau/astr123/notes/chapter27.html)

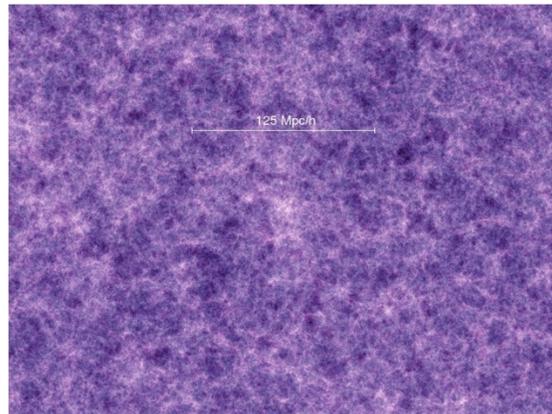
### Troisième preuve de l'existence de la matière sombre

Il doit y avoir de la matière exotique froide pour expliquer comment les galaxies peuvent se former en moins de 300 millions d'années.

**(ou les lois de la gravitation sont fausses.)**

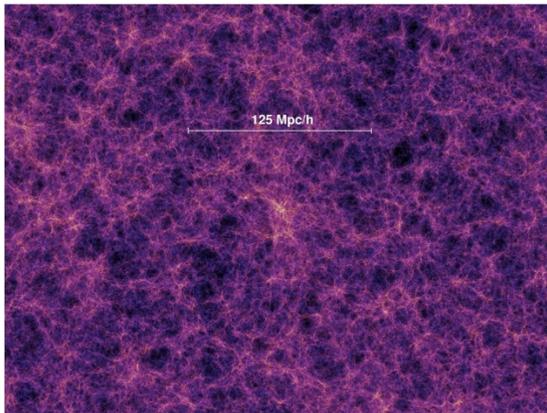
(Rappelons-nous qu'on étudie la possibilité de modifier la gravitation en ce moment. Une nouvelle version de la gravitation pourrait changer cette conclusion.)

Avec les proportions de matière ordinaire et de matière exotique présentées précédemment, on arrive à des simulations montrant des formations d'étoiles et de galaxies en moins de 300 millions d'années. Voici d'ailleurs les résultats d'une de ces simulations. Voici premièrement la structure de l'univers quand il avait un facteur d'échelle de  $1/19,3$ , donc un âge d'environ 200 millions d'années.



La ligne montre la distance entre deux objets distants de 175 Mpc dans l'univers actuel. Évidemment, à cette époque, ces deux objets étaient 19,3 fois plus près que cela.

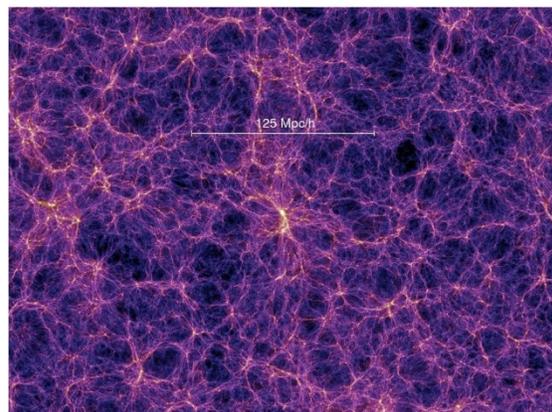
Dans cette simulation, la matière est déjà assez concentrée pour que les étoiles et les galaxies commencent à se former.

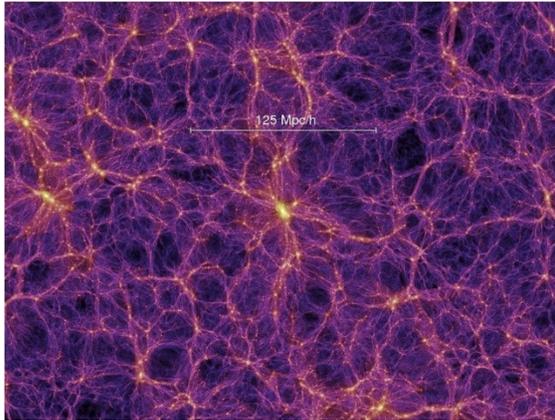


Voici maintenant l'univers avec un facteur d'échelle de  $1/6,7$  et un âge d'environ 1 milliard d'années.

On remarque que la gravitation continue à concentrer la matière.

Voici maintenant l'univers avec un facteur d'échelle de  $1/2,4$  et un âge de 4,5 milliards d'années.





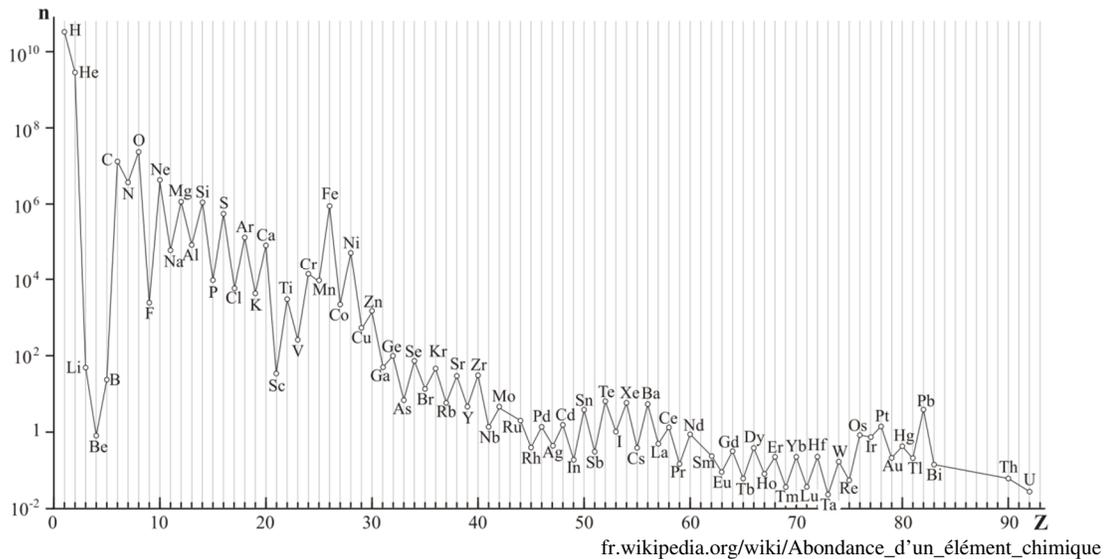
Et voici à quoi il ressemble aujourd’hui.

On observe que la gravitation continue son œuvre puisque la matière se concentre de plus en plus avec l’évolution de l’univers. Nous sommes en ce moment dans la phase de formation des superamas de galaxies.

Le modèle a cependant quelques difficultés depuis le lancement du télescope spatial James Webb en 2021. Ce télescope permet d’observer des galaxies très lointaines. Elles sont si lointaines, qu’on les voit telles qu’elles étaient quand l’univers était très jeune. Les observations montrent que les galaxies âgées d’environ 500 millions d’années semblent trop grosses et trop massives par rapport à ce que prévoit le modèle. C’est une histoire à suivre.

## 15.8 L’ORIGINE DES ÉLÉMENTS

Commençons avec ce graphique qui montre la proportion de chaque élément dans l’univers. (Attention, l’échelle verticale est logarithmique. La proportion des éléments est multipliée par 10 chaque fois qu’on monte d’une unité.)



Quelques minutes après la naissance de l’univers, l’univers contient uniquement de l’hydrogène (environ 90 % des atomes), de l’hélium (environ 10 % des atomes) et un peu de lithium. On doit donc expliquer comment sont apparus tous les autres éléments présents aujourd’hui. C’est dans les années 50 que la théorie de l’origine des éléments apparaît avec les travaux de Fred Hoyle, William Fowler, Margaret Burbidge et Geoffrey Burbidge.

(Leur théorie a été présentée dans un célèbre article appelé B<sup>2</sup>FH, les initiales des auteurs.) Depuis, la théorie n'a jamais cessé de se préciser et tout n'est pas encore certain.

Voyons comment on peut obtenir les éléments plus lourds que l'hélium.

### 1) La fusion nucléaire

On remarque que les éléments les plus abondants après l'hydrogène et l'hélium sont ceux qui sont les produits des fusions nucléaires qui se font dans le cœur des étoiles et lors des effondrements de naine blanche (supernova de type Ia). Ces éléments sont pratiquement tous les éléments pairs du tableau périodique jusqu'au fer. La fusion est, de loin, le mécanisme qui forme le plus d'atomes.

### 2) Rayons cosmiques

Le lithium, le béryllium et le bore ne sont pas très abondants. Ce n'est pas très étonnant puisqu'ils ne sont pas produits dans les étoiles. Aucune réaction de fusion ne les produit (on passe directement de l'hélium au carbone) et les réactions de fusion ont même plutôt tendance à transformer ces atomes en atomes plus lourds. Certains de ces atomes ont été fabriqués lors de la brève période de fusion à la naissance de l'univers, mais il y en a maintenant plus que ce qui a été produit à ce moment. Alors, d'où viennent ces atomes de lithium, de béryllium et de bore ?

Ces éléments sont produits par les rayons cosmiques. Les rayons cosmiques sont essentiellement des noyaux d'hydrogène (87 % de la masse), d'hélium (12 % de la masse) et un peu de noyaux plus lourds pouvant aller jusqu'au noyau de fer (1 % de la masse) qui se déplacent dans l'univers à très grande vitesse. Ils ont fort probablement été accélérés jusqu'à de grandes vitesses lors d'explosion de supernovas ou par le puissant vent solaire des supergéantes rouges. Quand un de ces rayons cosmiques heurte le noyau d'un élément plus lourd comme le carbone et l'oxygène, une partie du noyau peut être arraché (un phénomène appelé *spallation*) et cette partie arrachée peut être du lithium, du béryllium et du bore. Ce processus est à l'origine d'une partie des atomes de lithium et de la quasi-totalité des atomes de béryllium et de bore. (Notons que Hubert Reeves est un des pionniers de l'étude de la formation de ces éléments par les rayons cosmiques.)

### 3) La capture de neutron

Un noyau atomique peut considérablement augmenter sa masse en absorbant des neutrons. Les gros noyaux ne peuvent plus fusionner avec des héliums au-delà d'une masse atomique entre 50 et 60, mais ils peuvent toujours fusionner avec des protons et des neutrons. Les neutrons n'étant pas chargés, ils ne sont pas repoussés par les noyaux atomiques, ce qui permet aux noyaux de fusionner avec des neutrons relativement facilement. En ajoutant ainsi des neutrons, on finit par arriver à des noyaux qui ont beaucoup trop de neutrons et qui sont alors radioactifs. Une désintégration bêta transforme alors un des neutrons en proton, ce qui nous amène

à un élément ayant un numéro atomique plus grand. En répétant ce processus, on peut ainsi obtenir des noyaux ayant un numéro atomique assez grand.

Parfois, la capture de neutrons se fait lentement pour que le neutron se transforme en protons avant que d'autres neutrons soient absorbés. C'est le processus lent (*s-process* pour *slow process* en anglais). C'est ce qui se passe dans les étoiles en fin de vie. Dès la phase de fusion d'hélium, on a des neutrons libérés lors de collisions. Voici deux réactions importantes qui mènent à la libération de neutrons.



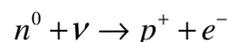
Plus tard, pendant les phases de fusion d'oxygène et de silicium, on a aussi beaucoup de neutrons libérés par photodissociation. Les neutrons libérés peuvent alors être capturés par de gros noyaux pour former des noyaux encore plus gros. (Au début, ce sont de gros noyaux qui étaient déjà présents à la formation de l'étoile. Il n'est pas nécessaire d'attendre la fusion du silicium pour avoir de gros noyaux.) On peut ainsi faire des éléments jusqu'au bismuth 209 par capture lente de neutrons pendant la vie de l'étoile. D'ailleurs, la présence de technétium 99 dans le spectre de certaines géantes rouges confirme que ce processus est à l'œuvre puisque la seule façon de créer cet élément est par capture de neutrons.

Parfois, la capture de neutrons se fait si rapidement que les nouveaux neutrons s'ajoutent avant que ceux-ci aient le temps de se transformer en protons. C'est le processus rapide (*r-process* pour *rapid process* en anglais). Dans ce cas, l'ajout rapide de neutrons forme des noyaux très lourds contenant un excès important de neutrons. Les neutrons se transforment ensuite en protons par désintégration bêta pour former des éléments ayant des numéros atomiques plus grands. À la fin de ce processus, on peut obtenir des éléments aussi lourds que le plutonium. Pour que l'ajout rapide de neutrons se produise, il faut qu'il y ait une quantité phénoménale de neutrons présents. Pour l'instant, les supernovas de type II (effondrement qui forme un cœur de neutrons) et la fusion d'étoiles à neutrons semblent être des lieux propices pour que ce processus se produise, mais on débat encore sur l'importance de chacun des phénomènes.

Environ la moitié des éléments plus lourds que le fer aurait été faite par le processus lent et l'autre moitié aurait été faite par le processus rapide.

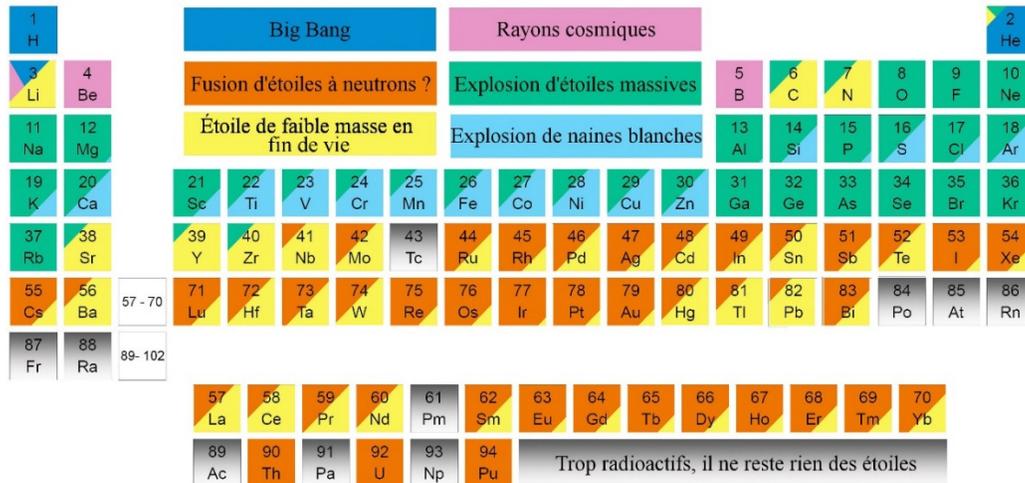
#### 4) L'interaction avec les neutrinos

Le bombardement des couches externes par la quantité phénoménale de neutrinos créés lors de l'explosion d'une supernova permet aussi d'obtenir, en transformant des neutrons en protons, des éléments plus légers qui ne sont pas souvent produits par la fusion nucléaire des étoiles. En effet, un neutrino peut interagir avec un neutron pour le transformer en proton.



Prenons par exemple le potassium, qui n'est pas un produit des fusions nucléaires. En bombardant des atomes d'argon, obtenus dans la chaîne de fusion du silicium, avec des neutrinos, on peut changer un neutron en proton pour obtenir du potassium.

Le tableau périodique suivant indique l'origine des éléments.



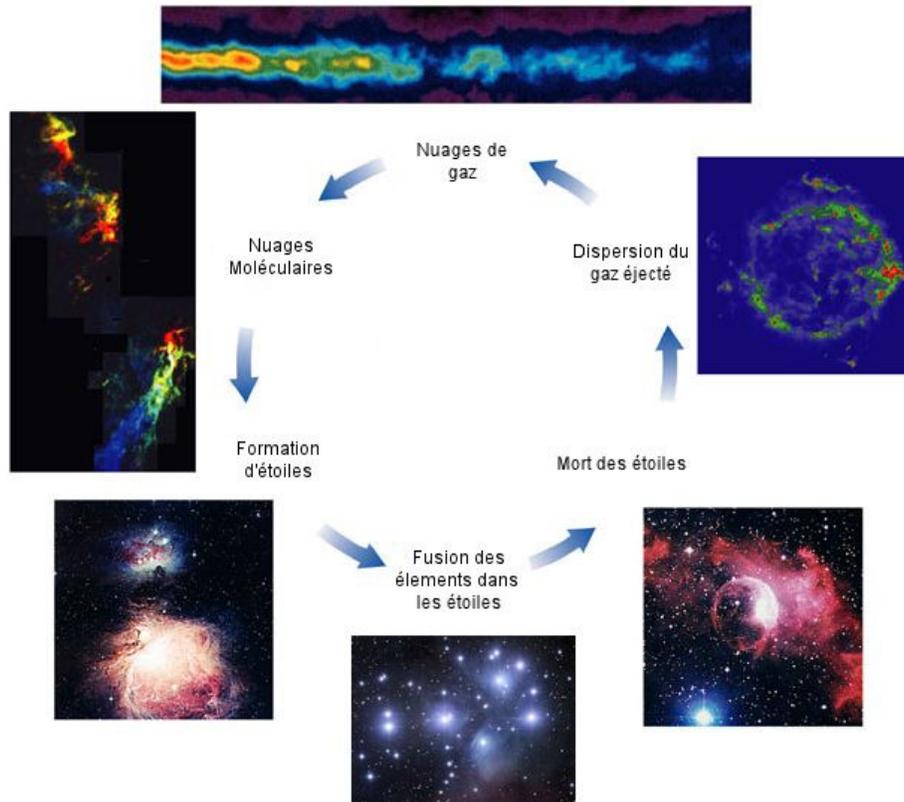
[www.astronomy.ohio-state.edu/johnson.3064/nucleo/](http://www.astronomy.ohio-state.edu/johnson.3064/nucleo/)

(Notons qu'il y a encore beaucoup d'incertitudes et ce tableau pourrait changer un peu à mesure que la théorie va s'améliorer.)

Certains éléments sont absents dans l'univers. Tous les éléments plus lourds que le plutonium ne peuvent pas être fabriqués et il n'y en a pas dans l'univers (sauf sur Terre où on les a fabriqués en laboratoire). D'autres éléments sont fabriqués dans les étoiles, mais il n'y a pas de noyaux stables pour ces éléments. Ces noyaux se désintègrent donc assez rapidement de sorte que ces éléments ne sont pas vraiment présents dans l'univers. C'est le cas du technétium (élément numéro 43) par exemple. Cet élément est bel et bien fabriqué dans les géantes rouges, mais il se désintègre trop rapidement (quelques millions d'années au mieux) pour que cet élément s'accumule dans l'univers.

Ce n'est pas tout de fabriquer des éléments, il faut aussi les disperser dans l'univers. On a vu dans ce cours qu'il y a une multitude de processus qui permet de disperser les atomes d'une étoile. Les supergéantes rouges éjectent une bonne partie de leur masse dans l'espace et cette matière a été enrichie en éléments lourds produits au centre de l'étoile par les vastes zones de convection qui brassent la matière dans l'étoile et amènent en surface des produits de fission. Les novas, les supernovas et les fusions d'étoiles à neutrons projettent aussi de la matière enrichie d'éléments lourds dans l'espace lors d'explosion. Par exemple, la fusion d'étoiles à neutrons observée en 2017 aurait éjecté 15 masses terrestres d'or dans l'espace !

Tout cela signifie aussi qu'il y a un cycle de la matière dans l'univers. Les étoiles se forment à partir du gaz, brillent un certain temps, puis meurent en rejetant une bonne partie du gaz dans l'espace. Ce gaz pourra alors, plus tard, s'effondrer à nouveau pour former de nouvelles étoiles. Ce cycle peut se répéter sans cesse.



[www.physast.uga.edu/~rls/astro1020/ch19/ovhd.html](http://www.physast.uga.edu/~rls/astro1020/ch19/ovhd.html)

Évidemment, on perd un peu de matière à chaque cycle, dans les naines blanches, les étoiles à neutrons et trous noirs, mais on ajoute un peu plus d'éléments lourds dans la matière qui est éjectée. Ainsi, à chaque cycle, on forme des étoiles contenant de plus en plus d'éléments lourds.

Les premières générations d'étoiles étaient presque uniquement faites d'hydrogène et d'hélium. Ce gaz étant moins opaque, les étoiles étaient plus compactes et pouvaient avoir des masses jusqu'à  $1000 M_{\odot}$  avant d'arriver à la limite d'Eddington. Aujourd'hui, les étoiles qui naissent contiennent plus d'éléments lourds, ce qui rend le gaz plus opaque. On obtient des étoiles moins compactes et la masse maximale n'est plus que de  $120 M_{\odot}$ . Dans quelques milliards d'années, il y aura encore plus d'éléments lourds et les étoiles seront encore moins compactes et auront une masse maximale encore plus petite.

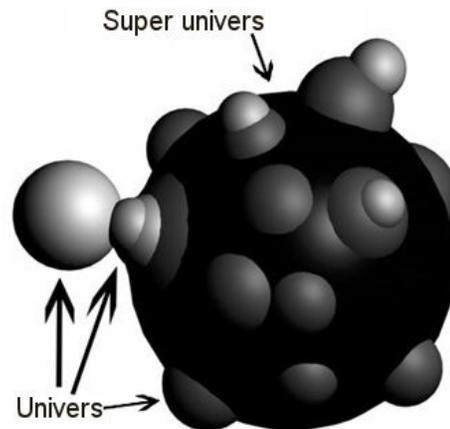
Pensez donc à cela : tous les atomes de votre corps, à l'exception des atomes d'hydrogène, furent formés dans des étoiles aujourd'hui mortes. Ces atomes ont été dispersés à la mort de l'étoile pour ensuite former d'autres étoiles puis être présents dans le nuage de gaz qui a donné naissance au Système solaire et finalement aboutir dans votre corps. Sans ces éléments lourds, la Terre et tout ce qu'il y a dessus ne pourraient pas exister. Pensez à cela aussi lorsque vous examinerez votre vaste collection de bijoux en or : ces atomes ont été créés lors de fusions d'étoiles à neutrons, ont été dispersés dans l'espace, ont abouti sur Terre quand elle s'est formée pour finalement se retrouver dans votre collection.

## 15.9 UN UNIVERS PARMIS D'AUTRES ?

Terminons avec une théorie spéculative sur ce qui a pu se passer pour que l'univers apparaisse.

On peut imaginer qu'il y avait un univers avant le Big Bang et que dans cet univers, une fluctuation quelconque a fait apparaître de l'énergie du vide dans une minuscule région, des millions de milliards de fois plus petite qu'un proton. Cette énergie du vide a alors provoqué l'expansion de cette minuscule région, au point de former l'univers actuel.

Or, il n'est pas impossible que de l'énergie du vide soit aussi apparue dans d'autres minuscules régions de ce super univers, amenant la création d'autres univers en plus du nôtre. Voici l'équivalent en deux dimensions de cette situation.



Il apparaît des univers un peu partout dans ce super univers, et même parfois dans d'autres univers déjà apparus.

[radiofreethinker.com/2011/02/13/the-structure-of-inconstant-constants/](http://radiofreethinker.com/2011/02/13/the-structure-of-inconstant-constants/)

Ces univers peuvent être nés avant ou après le nôtre et être dans des conditions bien différentes. Notre univers ne serait donc qu'un univers parmi d'autres créé par des bulles d'inflation dans un super univers. Les paramètres de chacun de ces univers pourraient être bien différents les uns des autres. Par exemple, la vitesse de la lumière pourrait être différente, mais ça pourrait aller plus loin que cela. On pourrait même avoir des univers répondant à des lois de la physique complètement différentes.

Cette théorie reste une pure spéculation puisqu'on ne connaît aucune expérience pouvant tester une telle hypothèse.

Cette idée permettrait en tout cas de répondre à une interrogation fondamentale : comment se fait-il que les conditions soient parfaites dans notre univers pour que la vie apparaisse ? En effet, on se rend compte que la vie ne pourrait pas apparaître si on changeait un peu certaines constantes de la nature. Par exemple, si on changeait un peu la grandeur de la force nucléaire, il n'y aurait pas de fusion nucléaire dans les étoiles, donc pas de vie. Beaucoup de paramètres de notre univers semblent parfaitement ajustés pour que la vie apparaisse. Si on change un peu un de ces paramètres, la vie n'est plus possible.

Avec un seul univers, on peut penser qu'on a été incroyablement chanceux ou on peut penser qu'un Dieu y est peut-être pour quelque chose. Avec une multitude d'univers différents, la question est moins embêtante. La très grande majorité de ces univers ne peut pas supporter la vie. Une gravitation trop forte, une énergie du vide trop grande, une vitesse de la lumière trop petite font en sorte que la vie n'apparaît pas dans ces univers. Toutefois,

sur la multitude d'univers qui se forment, il y en aurait quelques-uns qui vont naître avec les paramètres favorables à la vie.

Évidemment, les habitants de ces univers vont se trouver chanceux. En fait, tous les êtres vivants se trouvent chanceux. Personne ne se trouve malchanceux, parce que les malchanceux ne sont jamais nés. Cette idée est le *principe anthropique* qui dit que les êtres vivants dans un univers vont nécessairement observer des conditions favorables à la vie. Si ce n'était pas le cas, il n'y aurait pas d'êtres vivants pour faire cette observation.

## 15.10 UNE BRÈVE HISTOIRE DE LA VIE DE L'UNIVERS

On a beau dire que l'univers a un âge de 13,80 milliards d'années, il est difficile pour nous d'apprécier vraiment ce que signifie une telle durée. Pour tenter de mieux l'apprécier, compressons toute la vie de l'univers en 1 an, et donnant les dates auxquelles se sont produits les événements importants de l'histoire de l'univers. Dans cette histoire compressée, l'univers naît le 1er janvier à 0 h et on est en ce moment le 31 décembre à minuit. Voici ce qu'on obtient.

1 <sup>er</sup> janvier, 0 h	Naissance de l'univers.
Premier 0,01 millionième de seconde	Formation des noyaux atomiques.
1 janvier 0 h 14 min 35 s	Formation des atomes : l'univers devient transparent.
Janvier	Formation des premières étoiles et des galaxies.
Début septembre	Formation du Soleil et du Système solaire.
18 septembre	Premiers continents.
1 <sup>er</sup> octobre	Début de la vie sur Terre.
19 octobre	Début de la formation de l'atmosphère d'oxygène (jusqu'au 11 décembre).
1 <sup>er</sup> novembre	Apparition du sexe chez les microorganismes.
12 novembre	Premières cellules avec noyau.
Début décembre	Glaciation globale (Terre boule de neige).
17 décembre	Apparition des organismes pluricellulaires.
18 décembre	Premiers poissons et vertébrés. Premières brèves excursions hors de l'eau.

19 décembre	Premières plantes sur la terre ferme.
20 décembre 6 h	Premiers poissons à mâchoire.
21 décembre	Premiers arbres à feuilles. Premiers arthropodes sur la terre ferme.
22 décembre	Premiers poissons à plaques osseuses. Premiers poissons à poumons et nageoires charnues qui permettent la locomotion hors de l'eau. Premiers amphibiens.
23 décembre	Les amphibiens dominant. Les plantes à spores dominant. Premiers reptiles mammaliens. Premiers reptiles.
24 décembre	Insectes énormes (car le taux oxygène est élevé). Les plantes à graines (conifères et cycadales) commencent à prendre le dessus sur les plantes à spores.
25 décembre	Les reptiles mammaliens dominant. Premiers gros herbivores.
25 décembre 9 h	Grande extinction (96 % des espèces marines et 70 % des espèces terrestres disparaissent) provoquée par une éruption volcanique gigantesque en Sibérie. Après l'extinction, ce sont les reptiles qui dominant.
25 décembre	Premiers mammifères.
26 décembre 17 h	Début de la domination des dinosaures.
27 décembre	La domination des dinosaures continue.
28 décembre	La domination des dinosaures continue. Premiers oiseaux.
29 décembre	La domination des dinosaures continue.
30 décembre	La domination des dinosaures continue. Les fleurs (apparues le 28 décembre) prennent rapidement de l'expansion. L'herbe apparait le 30, mais ne deviendra abondante que le 31 décembre.
30 décembre 4 h	Premiers primates.
30 décembre 7 h	Extinction des dinosaures. Après l'extinction, ce sont les mammifères qui vont dominer, mais ils restent plutôt petits jusqu'à midi.

30 décembre midi	Début de l'explosion de la diversité des mammifères.
30 décembre minuit	Premiers singes.
31 décembre	
18 h 30	Premiers hominidés.
19 h 30	Premiers hominidés bipèdes.
21 h 10 à 23 h	Les australopithèques.
21 h 45	Premiers outils de pierre.
22 h 30	Début des cycles glaciaires.
22 h 30	Homo habilis.
22 h 45	Homo erectus.
23 h 45	Homme de Néandertal.
23 h 50	Utilisation du feu par l'homme, apparition de l'homo sapiens.
23 h 59 min 37 s	Invention de l'agriculture, domestication des animaux, premières villes.
23 h 59 min 46 s	Création de l'univers selon la bible (26 octobre 4004 av. J.-C. à 9 h le matin).
23 h 59 min 48 s	Invention de l'écriture, début de l'âge du bronze.
23 h 59 min 50 s	2350 av. J.-C. Premières dynasties en Égypte et à Sumer, construction des pyramides.
23 h 59 min 51 s	1920 av. J.-C. Moyen Empire en Égypte.
23 h 59 min 52 s	1470 av. J.-C. Nouvel empire en Égypte.
23 h 59 min 53 s	1000 av. J.-C. Début de l'âge du fer.
23 h 59 min 54 s	600 av. J.-C. Empire assyrien.
23 h 59 min 55 s	170 av. J.-C. Athènes. Début de l'Empire romain.

23 h 59 min 56 s	270 Empire romain.
23 h 59 min 57 s	710 Royaume des francs. Vikings.
23 h 59 min 58 s	1150 Moyen-Âge, croisades.
23 h 59 59 s	1580 Début de la colonisation de l'Amérique du Nord.

Comme on peut le voir, les humains ne sont pas là depuis bien longtemps dans la vie de l'univers.

## RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Température de l'univers en fonction du facteur d'échelle

$$T = \frac{2,7255K}{a}$$

## EXERCICES

### 15.3 Le rayonnement de fond cosmologique

- Quelle était la température de l'univers quand le facteur d'échelle de l'univers était de...
  - 0,5 ?
  - 0,01 ?
  - 0,0002 ?
- Quelle était la température de l'univers quand il avait un âge de 1 milliard d'années ?

### 15.5 La nucléosynthèse

- On sait que la densité de matière baryonique (donc celle des atomes faits de protons et de neutrons) est de

$$\rho_{baryon} = 0,42 \times 10^{-27} \frac{kg}{m^3} = 0,25 \frac{m_p}{m^3}$$

Sachant que l'univers observable est une sphère de 47 Gal, calculez combien il y a d'atomes dans l'univers observable. On va supposer qu'il n'y a que de l'hydrogène (71 %) et de l'hélium (29 %).

## RÉPONSES

### 15.3 Le rayonnement de fond cosmologique

1. a) 5,451 K    b) 272,55 K    c) 13 627,5K
2. 18,17 K

### 15.5 La nucléosynthèse

3.  $4,923 \times 10^{79}$  atomes