



L'histoire du Big-Bang et les nouvelles théories

ALEXANDRE ETMEZGUINE
BENJAMIN LARTIGUE
MATTHIEU SAUBOUA-BENELUZ

E.I.S.T.I
PAU

Résumé

Le cosmologue étudie l'univers dans sa structure et dans son évolution, en analysant les modèles de Big-Bang, mais il a depuis longtemps abandonné les conceptions des siècles et des millénaires passés, toutes celles attachées au mythe d'un univers éternellement identique à lui-même.

Nous montrerons le cheminement des idées et des résultats d'observations qui ont mené notre pensée vers ces modèles. Nous détaillerons leurs fondements, principes et théories. Nous montrerons comment les résultats actuels des observations, y compris les plus récents, y conduisent irrémédiablement. Et nous exposerons leurs principales caractéristiques, en soulignant ce qui les distingue des conceptions antérieures. Nous indiquerons enfin quelques unes des voies de recherche actuelles à leur sujet.

Table des matières

Résumé	1
Mots-clés	3
Introduction	4
Du concept d'univers en expansion aux fondements du Big Bang	6
Le concept d'univers	6
Les fondements du Big Bang	9
Les différents modèles de Big Bang et l'actualité cosmologique des satellites	10
Les modèles de Big Bang	10
Le dernier modèle de Big Bang : l'inflaton	11
Conclusion	13
Bibliographie	14
Annexe	15

Mots-clés

Année-lumière : distance parcourue en un an par la lumière voyageant dans le vide (environ 9,5 milliards de km)

Astrophysique : du grec astêr = étoile, astre et physis = science de la nature, est une branche interdisciplinaire de l'astronomie qui concerne principalement la physique et l'étude des propriétés des objets de l'univers (étoiles, planètes, galaxies, milieu interstellaire)

Atome : du grec atomos « qui ne peut être divisé », c'est la plus petite partie d'un corps simple pouvant se combiner chimiquement avec une autre

Big Crunch : effondrement de l'univers, phase de contraction faisant suite à l'expansion

Cosmologie : branche de l'astrophysique qui étudie l'Univers en tant que système physique

Isotropie : caractérise l'invariance des propriétés physiques d'un milieu en fonction de la direction

Physique quantique : toutes les théories physiques qui décrivent les comportements des atomes et des particules. La théorie de la relativité appartient à la physique quantique

Spectroscopie : l'étude des rayonnements électromagnétiques émis, absorbés ou diffusés par la matière

Introduction

« Je ne puis regarder une feuille d'arbre sans être écrasé par l'Univers. » V. Hugo. Un trou noir abyssal, une gigantesque nébuleuse, un engrenage de sphères en rotation. Au début du XX^{ème} siècle, A. Einstein ouvre les portes de la cosmologie moderne et les astrophysiciens retracent la trame du drame : le Big Bang ... quand tout a commencé.

Aristote se contentait d'observer tandis que le satellite européen Planck vient de nous offrir un dernier fond diffus cosmologique : la vision la plus fine jamais observée du monde. Les galaxies qui entourent la notre semblent s'en éloigner. Cela veut-il dire qu'elles fuient un endroit particulier à un instant précis ou qu'elles furent plus proches les unes des autres et donc que l'univers était plus concentré ? Tellement plus concentré qu'il explose ... dans un « grand boum » : un Big Bang ! Le Big Bang est un modèle cosmologique utilisé par les scientifiques pour décrire l'origine et l'évolution de l'Univers. En 1927, Georges Lemaître, chanoine catholique belge ébauche la théorie de l'expansion de l'univers. 1929, Edwin Hubble la met en évidence. 1950, le physicien anglais Fred Hoyle la nomme « le Big Bang » dans une émission de radio de la BBC au titre évocateur : "*The nature of things*". Depuis, le terme de Big Bang évoque toutes les théories qui font « commencer » notre Univers par une explosion, une dilatation rapide vieille de 13,82 milliards d'années. C'est aussi le nom que l'on donne à l'Univers pour cette période dense et chaude : « hot big bang ».

Si les modèles de Big Bang sont l'expression de notre cosmologie contemporaine, la discipline est ancienne : dès l'Antiquité, les regards et les pensées se tournent vers le Ciel, le Monde, le Cosmos, l'Univers. Concernée par l'Univers dans son ensemble, la cosmologie nous indique sans doute quelque chose sur la place que nous y occupons. Elle n'est encore qu'une croyance. Aujourd'hui, elle est une science même si à la Renaissance, Galilée et Newton furent les premiers cosmologues scientifiques. Mais il faut attendre le vingtième siècle pour

que pour qu'Albert Einstein lui confère un caractère relativiste, et la concrétise sous forme de modèles de Big Bang. Car il n'y a pas qu'un Big Bang, qu'une vision totalement figée de l'Univers et de son évolution, mais plutôt un ensemble de descriptions possibles, partageant des caractéristiques communes, ou différentes. Actuellement les astrophysiciens et les cosmologues examinent, les modèles de Big Bang, pour trouver lesquels semblent décrire le mieux notre Univers. Et le 21 mars 2013, ils divulguent « un portrait haute définition de nos origines, l'image source qui possède dans ses moindres pixels l'histoire primordiale des structures de l'Univers depuis 10^{-35} jusqu'à 370 000 ans après le Big Bang ». Sciences et Avenir avril 2013

Dans une première partie nous expliquerons comment les modèles de Big Bang ont commencé à être étudiés à partir du moment où les astrophysiciens ont accepté que l'Univers n'est pas éternellement identique et sans évolution mais au contraire en expansion.

Dans une deuxième partie, nous détaillerons les différents modèles de Big Bang avant de nous arrêter sur l'actualité cosmologique de ce début 2013 et les dernières données du satellite Planck.

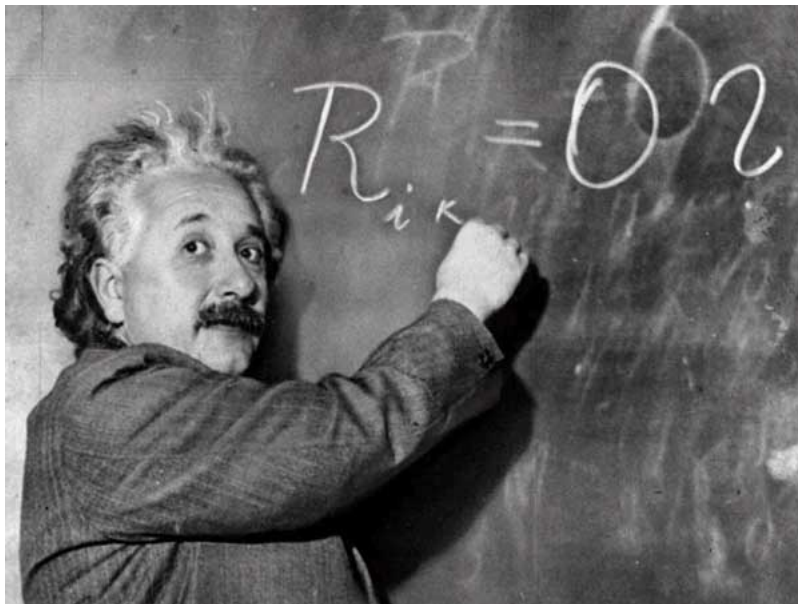


FIGURE 1 – Albert Einstein, père de la relativité générale

Du concept d'univers en expansion aux fondements du Big Bang

Le concept d'univers

Le concept d'Univers, constitue l'objet de la cosmologie. Son étude débute au XVII^e siècle, lorsque l'unité du Monde est reconnue et admise. Deux mille ans plus tôt, Platon qualifie le Monde de Cosmos, mais au sens étymologique du terme grec autrement dit dans son harmonie. Les mathématiciens, géomètres et astronomes de l'Antiquité décrivent un monde hiérarchisé et limité au système solaire : la Terre est au centre du monde et les autres sphères, la Lune, le Soleil, les planètes, et les Fixes (les étoiles) constituent la frontière du Monde, fini, borné.

Le dogme a tenu deux mille ans, les mouvements célestes sont décrits par des combinaisons de sphères et de cercles en rotation, jusqu'à ce qu'à la Renaissance, J.Kepler découvre que les planètes ont des trajectoires elliptiques. C'est la première révolution cosmologique. La synthèse des travaux de Copernic, Oresme, Galilée puis de Newton établissent ainsi les bases de la mécanique, de l'astronomie, de la cosmologie, et fonde la physique moderne.

L'idée d'univers, va à l'encontre des conceptions aristotéliennes : plus de centre du Monde, plus de position privilégiée de la terre, plus d'espace borné, clos, plus de mouvements circulaires. L'Univers n'est plus constitué de quatre éléments (la terre, l'eau, l'air et le feu) mais de petites particules : les atomes. Sa composition est universelle et la matière est la même sur terre, dans les étoiles, dans les galaxies, dans le vide interstellaire, etc. Les lois de la gravitation, l'électromagnétisme, la physique quantique, la relativité, s'y appliquent pareillement.

Newton énonce, les propriétés de l'espace et du temps. Pendant trois siècles, ses lois restent le cadre immuable de la physique qui identifie l'Univers seulement d'un point de vue géométrique.



FIGURE 2 – Isaac Newton, fondateur de la mécanique classique et de la théorie de la gravitation universelle

Puis en 1917 avec l'introduction des théories relativistes, la cosmologie se renouvelle et la physique quantique devient le volet complémentaire de la physique du XXe siècle. De nouvelles théories associées à de nouvelles technologies (grands télescopes, photographie et spectroscopie) permettent le développement d'une nouvelle cosmologie, aboutissant à la construction des modèles de Big Bang.

En 1924 Edwin Hubble réussit à montrer qu'un objet céleste, la Grande Nébuleuse d'Andromède, se situe en dehors de notre propre Galaxie, et même très loin d'elle : il démontre ainsi que l'Univers, immense, peuplé d'innombrables galaxies, beaucoup plus grand que la Voie Lactée, s'étend bien au-delà de notre Galaxie.

Vesto Slipher suggère que toutes ces galaxies s'éloignent, et qu'aucune ne se rapproche. Cette expansion reste encore en 1929 un mystère complet pour les astronomes, lorsque Hubble énonce sa loi qui déclare que la vitesse d'expansion d'une galaxie est proportionnelle à son éloignement. En 1930, le physicien belge Georges Lemaître démontre à partir de la théorie relativiste que l'Univers doit être en expansion ou en contraction. Le mouvement observé des galaxies, si régulier, d'extension si grande, est bien de nature cosmique, et relativiste. Il est impossible de l'imputer à une cause locale. Les galaxies ne sont pas en mouvement dans l'espace. Mais l'espace lui-même est en expansion, entraînant les galaxies comme le courant d'une rivière peut entraîner des bateaux dont les moteurs sont à l'arrêt. Ces derniers sont immobiles par rapport à l'eau . De même, les galaxies sont immobiles par rapport à l'espace qui les entraîne. Si l'on ne peut voir directement un tel courant d'espace, la relativité prévoit un tel phénomène et lui donne un sens : l'espace est en expansion.

En 1931, on ne connaît ni la physique nucléaire ni la physique des particules, et à peine la physique quantique, aussi ces idées d'expansion et d'évolution des galaxies restent encore « nébuleuses » ! Mais ces modèles, retravaillés, réajustés, sont finalement devenus les modèles de Big Bang même si au début, elles suscitent une certaine hostilité. Des opposants aux Big Bang soutiennent encore un modèle cosmologique selon lequel l'Univers resterait toujours identique à lui-même (état stationnaire).

L'intérêt pour les modèles de Big Bang renaît dans les années 1940. Les physiciens nucléaires comprennent que, selon ces modèles, l'Univers a dû passer par un état très dense, très chaud et très concentré, idéal pour le déroulement de réactions nucléaires.

Dans les années 1960, effectuant de nouveaux calculs de réactions nucléaires, quelques physiciens de Princeton prédisent que, si l'histoire de l'Univers s'est effectivement déroulée conformément aux modèles de Big Bang, il doit subsister aujourd'hui des vestiges d'un passé très reculé - l'époque où l'Univers était très chaud et très condensé - sous la forme d'un rayonnement « fossile » observable. Ce rayonnement électromagnétique devrait baigner tout l'Univers d'ondes radio.

En 1964, les deux radioastronomes Penzias et Wilson découvrent fortuitement en testant une antenne destinée à la radioastronomie ce rayonnement électromagnétique et ses propriétés. Rapidement mesurées, ces dernières se révèlent en accord avec les prédictions des modèles de Big Bang.

Les fondements du Big Bang

Les observations astronomiques et les lois physiques que nous connaissons nous mènent de manière quasiment inéluctable aux modèles de Big Bang. Le principe cosmologique fondamental est le suivant : pas de centre, pas de bords :

l'Univers est homogène : il peut y avoir une galaxie ici, et pas à côté. Mais aux très grandes échelles, dépassant celles des amas ou des super amas de galaxies, il n'y a pas de zone où les galaxies sont plus ou moins nombreuses, ou différentes

l'Univers est isotrope : non seulement il n'y a aucun point particulier, mais aucune direction particulière non plus : pas de haut et de bas, pas de centre de l'Univers, donc pas de direction vers un centre, pas d'axe de rotation. En l'absence d'indices suggérant le contraire, ce principe est adopté pour construire les modèles cosmologiques

l'Univers est en expansion : lorsqu'une étoile ou une galaxie émet de la lumière (un type particulier de rayonnement dans le domaine électromagnétique) qui parvient jusqu'à nous, cette lumière est décalée à une longueur d'onde plus petite ou plus grande (vers le bleu ou vers le rouge) si la source se rapproche ou s'éloigne de nous : c'est l'effet Doppler. C'est dans le spectre d'une galaxie, c'est-à-dire dans la décomposition de la lumière qu'elle a émise, que les astronomes savent parfaitement reconnaître un éventuel décalage, vers le rouge ou vers le bleu. Ils mesurent ainsi les vitesses des galaxies et établissent l'expansion de l'Univers

L'univers semble donc bien gouverné par la gravitation, elle-même décrite par la théorie de la relativité générale. Elle décrit l'Univers comme un espace-temps, muni de propriétés géométriques (courbure en particulier) qui incluent l'évolution temporelle. Ces propriétés géométriques dépendent, par les équations d'Einstein, du contenu en énergie de l'Univers. Admettant la Relativité Générale et la physique bien établie (électromagnétisme, physique atomique, thermodynamique, physique nucléaire, astronomie etc.) on est inévitablement conduit aux modèles de Big Bang.

Les différents modèles de Big Bang et l'actualité cosmologique des satellites

Les modèles de Big Bang

Les modèles de Big Bang nous disent que l'Univers est homogène, isotrope, et en expansion. Celle-ci se déroule sans changement notable depuis une certaine durée : l'âge de l'Univers [tU], soit environ 15 milliards d'années. À cause de l'expansion, la matière cosmique se dilue puis se refroidit, et enfin se structure. Plus on remonte dans le passé, plus l'Univers est concentré et chaud, moins il est structuré. Il est aujourd'hui peuplé d'objets structurés, microscopiques (atomes, molécules, cristaux) et astronomiques (étoiles, galaxies, planètes).

Rien de tout cela n'existait dans l'Univers primordial. Les modèles de Big Bang permettent de reconstituer l'évolution passée de l'Univers par l'application des lois de la physique. Cela conduit à distinguer trois époques :

- l'Univers primordial (premier million d'années), siège de nombreux phénomènes d'importance cosmique, tels que la formation des particules élémentaires et de noyaux atomiques, est opaque au rayonnement électromagnétique
- l'ère de la matière qui suit est beaucoup plus longue et dure à-peu-près quinze milliards d'années. Aux petites échelles spatiales, se forment des atomes, des molécules, des cristaux, des poussières. Une partie de ces objets, s'agglomèrent avec l'hydrogène et donnent naissance aux galaxies, aux étoiles, aux planètes, aux amas de galaxies ... à tous les objets que les astronomes observent dans l'Univers
- La recombinaison est la transition entre ces deux périodes. C'est le moment où l'Univers devient transparent et que fut émis le fameux rayonnement diffus cosmologique, que nous observons tout autour de nous, dans toutes

les directions : nous avons l'impression d'être au centre d'une gigantesque sphère brillante de luminosité (en ondes radio) uniforme

Telle est l'histoire de l'Univers du point de vue de la physique. Cependant, il n'y a pas un seul modèle de Big Bang, mais toute une famille dont les membres se distinguent par certaines caractéristiques de leur géométrie selon la courbure spatiale. Si elle est positive elle généralise la surface d'une sphère, si elle est nulle c'est la surface d'un plan. Les espaces à courbure négative sont moins familiers. Le plus surprenant est la simplicité, notamment géométrique, de ces modèles cosmologiques fondés sur la relativité générale. Comment se fait-il que des modèles aussi simples décrivent si bien quelque chose d'aussi compliqué que l'Univers dans sa globalité ?

Les très nombreux résultats d'observation du fond diffus cosmologique par les satellites confirment de mieux en mieux l'accord exceptionnel entre la réalité et les prédictions théoriques des modèles de Big Bang.

Le dernier modèle de Big Bang découvert : l'inflaton

En 1992, deux chercheurs américains, G.Smoot et J.Mather conçoivent le satellite Cobe et l'on découvre les germes des galaxies : dans un fond proche du zéro absolu, ils avaient mis en évidence d'infimes pics de températures, et leurs variations de densités créaient au cours des milliards d'années suivantes les murs et amas de galaxies, les étoiles ...

2013, le satellite Planck balaye le ciel pour y capter le rayonnement fossile et les astrophysiciens détectent l'empreinte de l'une des premières briques permettant d'expliquer l'origine de l'Univers actuel : l'inflaton. C'est une particule, l'énergie noire, une substance inconnue, qui associée au champ quantique se serait transformée en une énergie thermique et aurait provoqué la fuite des galaxies. Reste encore à prouver que l'inflaton serait à l'origine de la matière et de toutes les structures actuelles.

Cette dernière image du fond diffus cosmologique datée du 21 mars 2013, fixe l'instant précis où l'Univers sort du brouillard opaque et très dense. Juste après le Big Bang, sa température atteint cent milliards de milliards de milliards de degrés. Les particules s'agitent dans la plus grande confusion et piègent les photons, vecteurs de lumière. Puis l'Univers se dilate et la température diminue. La période de recombinaison commence, nous la situons à 370 000 ans après le Big Bang : sa densité est un milliard de fois plus forte qu'aujourd'hui mais sa température est descendue à 2700 degrés. Les particules se calment et s'organisent en atomes sta-

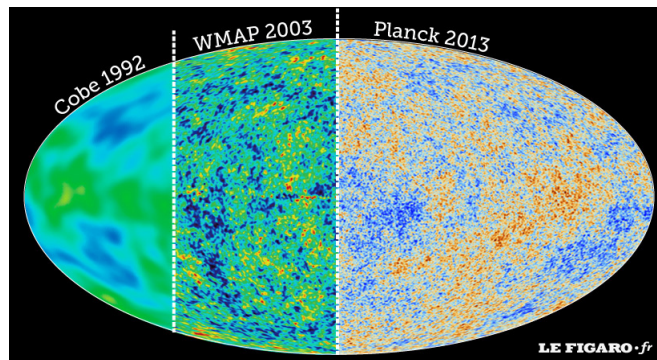


FIGURE 3 – Relevés effectués par le satellite Planck

bles, l'hydrogène et l'hélium, les deux ingrédients initiaux du monde. Les photons libérés, s'échappent. C'est ce moment que le satellite Planck a capté : un écho de lumière du Big Bang encore plus précis que celui du satellite Cobe. Il nous donne ainsi accès aux quelques paramètres cosmologiques qui permettent de décrire l'Univers tout entier et annulent certaines théories cosmologiques en confirmant un modèle classique de Big Bang : celui de l'inflaton.

L'Univers aurait connu une phase brutale d'expansion juste après le Big Bang. Il se serait très rapidement dilaté et aurait ainsi distribué de façon homogène toutes les propriétés avant de laisser la place à d'autres forces, se transformant elle même en matière. L'inflaton serait ainsi la source de tout ce qui est ensuite apparu dans le cosmos.

Une nouvelle voie de recherche s'ouvre. Il se pourrait qu'après avoir dépouillé toutes les données envoyées par le satellite Plank et finalisé les premiers résultats scientifiques, la théorie de la relativité générale soit remise en question.

Conclusion

Aujourd'hui, certains indices suggèrent que l'expansion pourrait continuer éternellement, voire s'accélérer. Mais tout ceci est à prendre avec de grandes précautions car nous ne savons pas encore précisément lesquels, dans la famille des modèles de Big-bang, conviennent le mieux pour décrire notre Univers. Astrophysiciens et cosmologues s'interrogent sur la courbure et la topologie de la géométrie spatiale, sur la valeur de la constante de Hubble qui mesure le taux actuel de l'expansion, sur la forme précise de la loi d'expansion, accélérée ou décélérée, sur son futur, éternel ou débouchant sur un Big Crunch.

Malgré les immenses succès des modèles de Big bang, il nous faut rester modestes : la cosmologie, et la science en général, ne nous fournira jamais l'explication du monde, et de la place que nous y occupons.



« Il connaît l'Univers et ne se connaît pas » Jean de la fontaine

Bibliographie

Les grandes questions de la cosmologie : le Big Bang Marc Lachieze-Rey *Conférence à l'Université des savoirs 4 juillet 2000*

L'origine de l'Univers avril 2013 n°794 *Revue mensuelle Sciences et Avenir*

Bang l'histoire complète de l'Univers Flammarion B.May, P.Moore, C.Lintott

La naissance des éléments : du Big Bang à la Terre Sylvie Vauclair, Odile Jacob

Une brève histoire du Temps : du Big Bang aux Trous noirs *Champs Sciences / Poche* Stephen Hawking

Annexe

Temps après le big bang (ap. B.B.)	Événements	Années passées et futures
0	Big bang.	Il y a 13,7 milliards d'années
10^{-35} à 10^{-33} secondes	Période d'inflation.	
10^{-33} secondes	Naissance des quarks et antiquarks. Ils s'annihilent les uns les autres, laissant un léger excédent de quarks.	
10^{-5} secondes	Les quarks se combinent pour former protons et neutrons.	
10^{-3} secondes	Formation des atomes d'hydrogène et d'hélium.	
1 à 3 minutes	Formation des éléments légers jusqu'au bore.	
370 000 ans	Émission du fond diffus cosmologique – l'Univers devient transparent.	
200 millions d'années	Naissance des premières étoiles, réionisation.	Il y a 13,5 milliards d'années
3 milliards d'années	Formation des galaxies âgées, des quasars et des plus vieilles étoiles de la Voie lactée.	Il y a 10,4 milliards d'années?
9,1 milliards d'années	Notre système solaire (la Terre y compris) est formé.	Il y a 5,6 milliards d'années
9,9 milliards d'années	Formation des premiers fossiles.	Il y a 3,8 milliards d'années
13,4 milliards d'années	Premiers reptiles.	Il y a 320 millions d'années
13,5 milliards d'années	Séparation de l'Afrique et de l'Amérique; les dinosaures apparaissent.	Il y a 200 millions d'années
13,64 milliards d'années	Fin des dinosaures; diversification des petits mammifères.	Il y a 65 millions d'années
13,695 milliards d'années	Évolution des primates, et en particulier des grands singes.	Il y a 5 millions d'années
13,6998 milliards d'années	<i>Homo sapiens</i> .	Il y a 195 000 ans
13,6999 milliards d'années	Dernier âge glaciaire, aube du monde moderne.	Il y a 10 000 ans
13,7 milliards d'années	Aujourd'hui.	
14,7 milliards d'années	La Terre devient inhabitable.	Dans 1 milliard d'années
18,7 milliards d'années	Le Soleil se transforme en géante rouge, destruction de la Terre.	Dans 5 milliards d'années
23,7 milliards d'années	Le Soleil devient une naine blanche.	Dans 10 milliards d'années
10^{14} années	La formation des galaxies et des étoiles s'arrête.	Dans une centaine de milliers de milliards d'années
10^{36} années	50 % de la totalité des protons sont désintégrés.	
10^{40} années	Tous les protons ont disparu, les trous noirs dominent.	
10^{100} années	Les trous noirs se désintègrent.	
10^{150} années	Ère des photons: l'Univers atteint un état d'énergie extrêmement bas?	

FIGURE 4 – Chronologie du Big Bang

**Big bang,
13,7 milliards
d'années.**

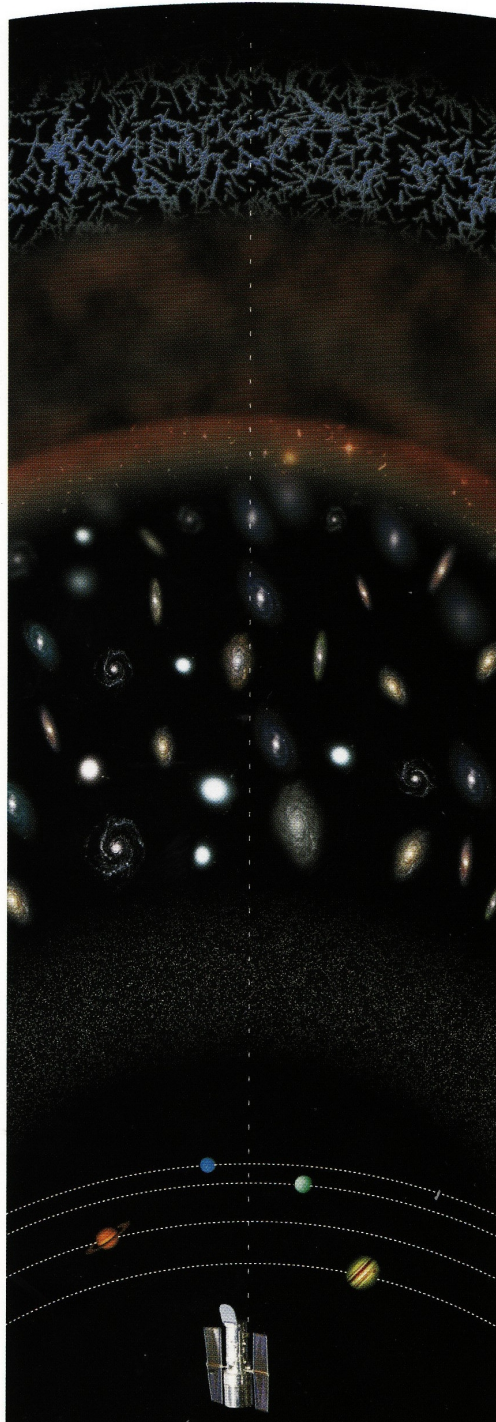
Âge des Ténèbres.

**Les plus lointaines
galaxies observées:
leur lumière a été
émise il y a
12,7 milliards
d'années.**

**Galaxies voisines,
telles que l'amas
de la Vierge. Leur
lumière a été émise
il y a 50 millions
d'années.**

**Proxima du Centaure
(Proxima Centauri),
étoile la plus proche,
située à 4,3 années-
lumière.**

Vous êtes ici.



**Univers opaque,
13,4 milliards
d'années.**

**Formation des
premières étoiles
et galaxies,
13,2 milliards
d'années.**

**Nombre des
galaxies que nous
observons se sont
formées à cette
période.**

**Andromède,
grande galaxie
la plus proche,
située à
2,2 millions
d'années-lumière.**

**Jupiter, tel qu'elle
était il y a environ
une heure.**

FIGURE 5 – Vue de l'univers du Big Bang à nos jours