

# Le Big Bang



# L'Univers et le « Big Bang »

**L'Univers** est l'ensemble de tout ce qui existe, régi par un certain nombre de lois. La cosmologie cherche à appréhender l'Univers d'un point de vue scientifique, comme l'ensemble de la matière distribuée dans le temps et dans l'espace. Pour sa part, la cosmogonie vise à établir une théorie de la création de l'Univers sur des bases philosophiques ou religieuses. La différence entre ces deux définitions n'empêche pas nombre de physiciens d'avoir une conception finaliste de l'univers : voir à ce sujet le principe anthropique. Si l'on veut faire correspondre le mouvement des galaxies avec les lois physiques telles qu'on les conçoit actuellement, on peut considérer que l'on n'accède par l'expérience qu'à une faible partie de la matière de l'Univers, le reste se composant de matière noire. Par ailleurs, pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'univers, il faut également introduire le concept d'énergie sombre. Plusieurs modèles alternatifs ont été proposés pour faire correspondre les équations et nos observations en prenant d'autres approches.

## Découverte dans l'Histoire

Les sciences grecques tentèrent de comprendre le monde et de l'expliquer :

- les philosophes Parménide, Platon, et Aristote avaient intégré l'idée d'une Terre sphérique, mais ils la voyaient au centre de l'Univers physique, alors que l'école de Milet se représentait la Terre plate;
- Ératosthène tenta de réaliser des calculs précis, notamment la mesure de la circonférence d'un méridien terrestre ;
- Aristarque de Samos est le premier à envisager un modèle de système planétaire héliocentriste. Cette découverte ne fut alors pas suivie, pour des raisons philosophiques surtout parce qu'une telle cosmologie est en désaccord avec la conception géocentriste du monde qui était retenue par de grands philosophes comme Parménide, Platon, et Aristote. Il calcule aussi la distance Terre-Lune pour laquelle il trouve une valeur discutée, mais qui se situe en tout état de cause dans un ordre de grandeur acceptable, ainsi qu'une distance Terre-Soleil ;
- Hipparque poursuit ce travail : il recalcule, selon des méthodes nouvelles, la distance Terre-Soleil ainsi que la distance Terre-Lune (pour laquelle il retient la valeur de  $67 \frac{1}{3}$  rayons terrestres, contre 60,2 en réalité), recense 1.500 étoiles, retrouve approximativement la période de précession des équinoxes, qui était déjà connue des Babyloniens.
- Ptolémée poursuit le travail d'Hipparque. Son Almageste sera la référence astronomique essentielle pendant treize siècles.

Ces connaissances du monde grec perdurèrent et influencèrent les sciences arabes après l'effondrement de l'Empire romain d'Occident. Elles restèrent présentes en Orient (particulièrement, avec des hauts et des bas, à Byzance), même si Cosmas d'Alexandrie tente, sans succès, de restaurer le modèle d'un monde plat. La Renaissance porte à son apogée cette représentation du monde, grâce aux explorations et aux grandes découvertes qui eurent lieu du XIII<sup>e</sup> au XVI<sup>e</sup> siècles, à partir de systèmes géographiques et cosmologiques très élaborés (projection de Mercator).

La révolution copernicienne bouleverse cette cosmologie en trois étapes :

1. Copernic redécouvre l'héliocentrisme. Toutefois, cette redécouverte n'est que partiellement révolutionnaire : en effet, Copernic reste attaché aux sphères transparentes du modèle d'Aristote (pourtant délaissé par Ptolémée) censées soutenir les planètes et leur imprimer leur mouvement ; il présente son système comme un simple artifice destiné à simplifier les calculs.
2. Le dominicain Giordano Bruno défend la réalité du modèle héliocentrique et l'étend à toutes les étoiles, ouvrant la dimension de l'Univers physique à l'infini. Il sera brûlé au bûcher en tant qu'hérétique non pour des raisons scientifiques, mais religieuses.
3. Kepler, Galilée et Newton posent les bases fondamentales de la mécanique à partir du mouvement des planètes, grâce à leurs études respectivement du mouvement elliptique des planètes autour du Soleil, l'affinement des observations astronomiques avec la définition du mouvement uniformément accéléré, et la formalisation mathématique de la force de gravité. *L'Univers*, toutefois, reste confiné dans le système solaire.



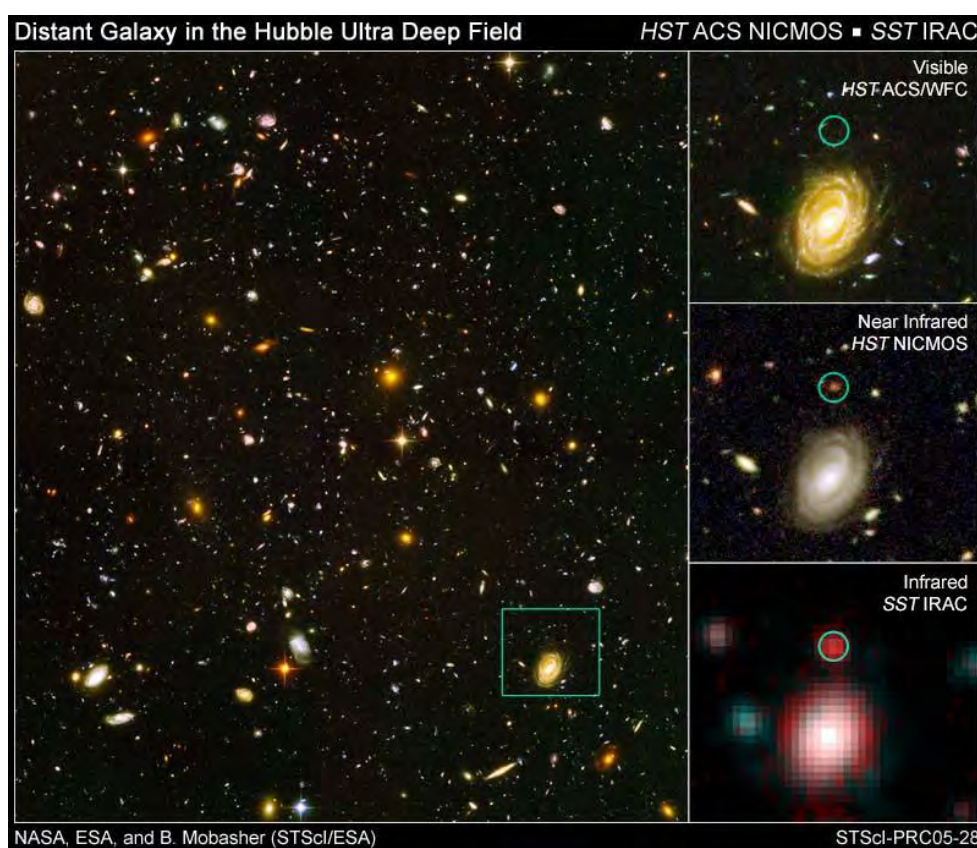
*L'Univers selon le système de Ptolémée, vu par Andreas Cellarius en 1660-1661*

Des modèles physiques tels que la sphère armillaire ou l'astrolabe ont été élaborés. Ils permettent d'enseigner et de calculer la position des astres dans le ciel visible. Aujourd'hui encore, la carte du ciel mobile aide les astronomes amateurs à se repérer dans le ciel, c'est une réincarnation de l'astrolabe.

### **Naissance - Expansion, âge et Big Bang**

Les observations du décalage vers le rouge des rayonnements électromagnétiques en provenance d'autres galaxies suggèrent que celles-ci s'éloignent de notre galaxie, à une vitesse radiale d'éloignement proportionnelle à ce décalage (effet Doppler). En étudiant les galaxies proches, Edwin Hubble s'est aperçu que la vitesse d'éloignement d'une galaxie était proportionnelle à sa distance par rapport à l'observateur (loi de Hubble); une telle loi est explicable par un Univers visible en expansion. Bien que la constante de Hubble ait été révisée par le passé dans d'importantes proportions (dans un rapport de 10 à 1), la loi de Hubble a été extrapolée aux galaxies éloignées, pour lesquelles la distance ne peut être calculée au moyen de la parallaxe; cette loi est ainsi utilisée pour déterminer la distance des galaxies les plus éloignées. En extrapolant l'expansion de l'Univers dans le passé, on arrive à une époque où celui-ci a dû être beaucoup plus chaud et beaucoup plus dense qu'aujourd'hui. C'est le modèle du Big Bang, conçu par Georges Lemaître prêtre catholique belge, qui est un ingrédient essentiel du modèle standard de la cosmologie actuelle et possède aujourd'hui un grand nombre de confirmations expérimentales. La description du début de l'histoire de l'Univers par ce modèle ne commence cependant qu'après qu'il fut sorti d'une période appelée ère de Planck durant laquelle l'échelle d'énergie de l'Univers était si grande que le modèle standard n'est pas en mesure de décrire les phénomènes quantiques qui s'y sont déroulés. Durant cette époque, seule une théorie de la gravitation quantique pourrait expliquer le comportement microscopique de la matière sous l'influence importante de la gravité. Mais les physiciens ne disposent pas encore d'une telle théorie. Pour des raisons de cohérence avec les observations, après l'ère de Planck le modèle du Big Bang privilégie aujourd'hui l'existence d'une phase d'inflation cosmique très brève mais durant laquelle l'Univers aurait grandi de façon extrêmement rapide. C'est à la suite de cette phase que l'essentiel des particules de l'Univers aurait été créé avec une haute température, enclenchant un grand nombre de processus importants qui ont finalement abouti à l'émission d'une grande quantité de lumière, appelé fond diffus cosmologique, qui peut être aujourd'hui observé avec une grande précision par toute une série d'instruments (ballons-sondes, sondes spatiales). C'est l'observation de ce rayonnement fossile micro-onde, remarquablement uniforme dans toutes les directions, qui constitue aujourd'hui l'élément capital qui assoit le modèle du Big Bang comme description correcte de l'Univers dans son passé lointain. De nombreux éléments du modèle restent encore à déterminer (par exemple le modèle décrivant la phase d'inflation), mais il y a aujourd'hui consensus de la communauté scientifique autour du modèle du Big Bang. Dans le cadre du modèle  $\Lambda$ CDM, les contraintes issues des observations de la sonde WMAP sur les paramètres cosmologiques indiquent une valeur la plus probable pour l'âge de l'Univers à environ 13,82 milliards d'années avec une incertitude de 0,02 milliard

d'années, ce qui est en accord avec les données indépendantes issues de l'observation des amas globulaires ainsi que celle des naines blanches. Cet âge a été confirmé en 2013 par les observations du satellite Planck. L'expansion de l'Univers est modélisée par la théorie de la relativité générale. Celle-ci stipule en effet que l'Univers dans son ensemble est soumis à des forces imposées par les différentes formes de matière qui le composent, et qu'il ne peut demeurer statique : soit il est mû par une force centrifuge qui le fait s'étendre (expansion consécutive au Big Bang et qui pourrait aboutir au Big Rip), soit, dépourvu d'une telle force, ses forces centripètes de gravitation le font se ramasser (Big Crunch). Réciproquement, l'expansion de l'Univers exerce une influence sur la densité et la pression de cette matière. Ainsi, c'est la connaissance des propriétés physiques de ces formes de matière (en particulier leur équation d'état) qui permet de prédire le comportement de l'expansion. Les équations qui la décrivent sont connues sous le nom d'équations de Friedmann. Les observations permettent non seulement de connaître le taux d'expansion actuel de l'Univers (la constante de Hubble à l'instant présent), mais aussi celui de l'Univers par le passé, fournissant ainsi indirectement des informations sur les formes de matière qui emplissent l'Univers. Dans le cadre des modèles d'univers les plus classiques, et notamment dans celui des univers de Friedmann, l'expansion ralentit au cours du temps. Dans certains cas, l'expansion finit même par s'arrêter et se muer en contraction, précipitant l'Univers dans le Big Crunch.



*HUDF-JD2, galaxie primordiale mise en évidence dans le cercle situé sur les trois agrandissements à droite de l'image. Son décalage vers le rouge est  $\sim z=6,5$ , donnant un temps de regard vers le passé de 850 millions d'années après le Big Bang*

### Taille et Univers observable

À ce jour, aucune donnée scientifique ne permet de dire si l'Univers est fini ou infini. Certains théoriciens penchent pour un Univers infini, d'autres pour un Univers fini mais non borné. Un exemple d'Univers fini et non borné serait l'espace se refermant sur lui-même. Si on partait tout droit dans cet Univers, après un trajet, très long certes, il serait possible de repasser à proximité de son point de départ. Les articles populaires et professionnels de recherche en cosmologie emploient souvent le terme « Univers » dans le sens d'« Univers observable ». L'être humain vit au centre de l'Univers observable, ce qui est en contradiction apparente avec le principe de Copernic qui dit que l'Univers est plus ou moins uniforme et ne possède aucun centre en particulier. Le paradoxe se résout simplement en tenant compte du fait que la lumière se déplace à la même vitesse dans toutes les directions et que sa vitesse n'est pas infinie : regarder au loin revient à regarder un événement décalé dans le passé du temps qu'il a fallu à la lumière pour parcourir la distance séparant l'observateur du phénomène observé. Or il ne nous est pas possible de voir



de phénomène issu d'avant le Big Bang. Ainsi, les limites de l'Univers observable correspondent au lieu le plus lointain de l'Univers pour lesquelles la lumière a mis moins de 13,8 milliards d'années à parvenir à l'observateur, ce qui le place inmanquablement au centre de son Univers observable. On appelle « horizon cosmologique » la première lumière émise par le Big Bang il y a 13,8 milliards d'années.

On estime que le diamètre de cet Univers observable est de 100 milliards d'années-lumière. Celui-ci contient environ  $7 \times 10^{22}$  étoiles, répandues dans environ 100 à 200 milliards de galaxies, elles-mêmes organisées en amas et superamas de galaxies. Mais le nombre de galaxies pourrait être encore plus grand, selon le champ profond observé avec le télescope spatial Hubble. Il est cependant possible que l'Univers observable ne soit qu'une infime partie d'un Univers réel beaucoup plus grand. La définition de l'Univers choisie par cet article (« ensemble de tout ce qui existe ») soulève par ailleurs différents problèmes. Tout d'abord, il ne peut pas posséder de « bord » au sens intuitif du terme. En effet, l'existence de bord impliquerait l'existence d'un extérieur à l'Univers. Or par définition l'Univers est l'ensemble de tout ce qui existe, il ne peut donc rien exister à l'extérieur. Toutefois cela ne signifie pas que l'Univers est infini, il peut être fini sans avoir de « bord », sans avoir en fait d'extérieur. Cela soulève une autre interrogation : que signifie pour l'Univers d'être en expansion s'il n'a ni bord ni extérieur ?

## Objets les plus distants

En septembre 2014, la galaxie la plus distante jamais observée serait z8 GND 5296 dont la découverte a été annoncée le 23 octobre 2013. Formée environ 700 millions d'années après le Big Bang, elle serait située à une distance **comobile** d'environ 30 milliards d'années-lumière du Système solaire.

**Nota :** La **distance comobile** est une caractérisation de la distance séparant deux objets astronomiques en faisant abstraction de l'expansion de l'Univers, c'est-à-dire en utilisant une unité de longueur qui suit l'expansion de l'univers. La relativité générale est une théorie locale, qui modélise la gravitation, ce qui manque dans la relativité restreinte. L'espace y est une variété riemannienne dont la courbure locale est reliée à la gravitation. La variété elle-même est globale. Dans le contexte de la relativité générale, le postulat de Weyl est qu'un référentiel privilégié de l'espace-temps **peut** être défini et avoir un sens physique. La notion la plus courante qui permet d'implémenter cette notion est celle de coordonnées comobiles, où le référentiel spatial est attaché aux positions (spatiales) moyennes des galaxies (ou de n'importe quel gros morceau de matière qui se déplace plutôt lentement). Dans ce choix de coordonnées, l'on peut ignorer à la fois le temps et l'expansion de l'Univers pour se concentrer sur la forme de l'espace (ou plus formellement, d'une hypersurface spatiale à temps cosmologique constant).

L'espace dans les coordonnées comobiles est (en moyenne) statique. Ceci est parfaitement cohérent avec le fait que l'Univers s'étend. Un choix de coordonnées n'est qu'un choix d'étiquettes numériques. Il arrive, selon le modèle standard du Big Bang, qu'un certain choix soit fait pour coller ces étiquettes de façon très pratique pour les calculs formels et aussi pour penser l'Univers comme objet statique. Pour revenir à l'expansion très réelle de celui-ci, il suffit de se rappeler le facteur d'échelle. Ainsi, il y a aussi le temps cosmique qui, pour l'observateur sur un point spatial fixe en coordonnées comobiles, est identique à sa mesure locale du temps. La distance comobile est donc la distance en coordonnées comobiles entre deux points dans l'espace, au même point du temps cosmique.

Les autres galaxies les plus distantes observées à ce jour seraient :

- la galaxie MACS0647-JD dont la découverte a été annoncée le 15 novembre 2012;
- la galaxie UDFy-38135539, découverte en 2010, dont l'âge est estimé à environ 13,692 milliards d'années;
- la galaxie UDFj-39546284, découverte en 2011, dont l'âge est estimé à environ 13,2 milliards d'années;
- les galaxies de l'amas galactique Abell 2218, découvert en 2001, dont l'âge est estimé à environ 13 milliards d'années.

## Forme

Une importante question de cosmologie est de connaître la forme de l'Univers.

1. Est-ce que l'Univers est « plat » ? C'est-à-dire : est-ce que le théorème de Pythagore pour les triangles droits est valide à de plus grandes échelles ? Actuellement, la plupart des cosmologues pensent que l'Univers observable est (presque) plat, juste comme la Terre est (presque) plate.

2. Est-ce que l'Univers est *simplement connexe* ? Selon le modèle standard du Big Bang, l'Univers n'a aucune frontière spatiale, mais peut néanmoins être de taille finie.

Ceci peut être compris par une analogie bidimensionnelle : la surface de la Terre n'a aucun bord, mais possède une aire bien déterminée. Vous pouvez également penser à un cylindre et imaginer de coller les deux extrémités du cylindre ensemble, mais sans plier le cylindre. C'est aussi un espace bidimensionnel avec une surface finie, mais au contraire de la surface de la Terre, il est plat, et peut ainsi servir de meilleur modèle. Par conséquent, à proprement parler, nous devrions appeler les étoiles et les galaxies mentionnées ci-dessus « images » d'étoiles et de galaxies, puisqu'il est possible que l'Univers soit fini et si petit que nous pouvons voir une ou plusieurs fois autour de lui, et le vrai nombre d'étoiles et de galaxies physiquement distinctes pourrait être plus petit. Des hypothèses d'Univers multiconnexes ont été proposées et sont en cours d'étude.

### Modèle dimensionnel

L'Univers a-t-il trois, six, dix dimensions ou plus ? La théorie des cordes prédit qu'espace et matière sont consubstantiels. Il n'y a pas de « contenant » (l'espace) mais un fond d'espace-temps qui interagit avec la matière. Dans certains cas particuliers, la notion de « nombre de dimensions de l'espace » dépend de l'intensité avec laquelle les cordes réagissent entre elles. Si cette interaction est faible, elles semblent se propager dans un espace à neuf dimensions - auxquelles il faut rajouter celle du temps. Si cette interaction croît, cela développe une dimension de plus (ou plus en fonction de l'intensité de l'interaction) à laquelle il faut toujours rajouter celle du temps. Supposons maintenant qu'on enferme l'Univers dans un espace « fini » (une boîte pour être concret) et que cet espace rapetisse jusqu'à  $10^{-32}$  centimètre de côté, la théorie des cordes le prédit équivalent à un Univers très grand. La conception d'espace est fondamentalement bouleversée. La mise en route du grand collisionneur de hadrons de Genève, *Large Hadron Collider* (plus communément appelé LHC), viendra peut-être confirmer cette théorie. Elle ne pourra en revanche pas l'infirmier, car aucun ordre de grandeur n'a été prédit par la théorie des cordes. Ainsi, si le phénomène n'est pas détecté, cela pourrait signifier que trop peu d'énergie a été générée pour rendre le phénomène observable, sans impliquer pour autant que la théorie soit nécessairement erronée.

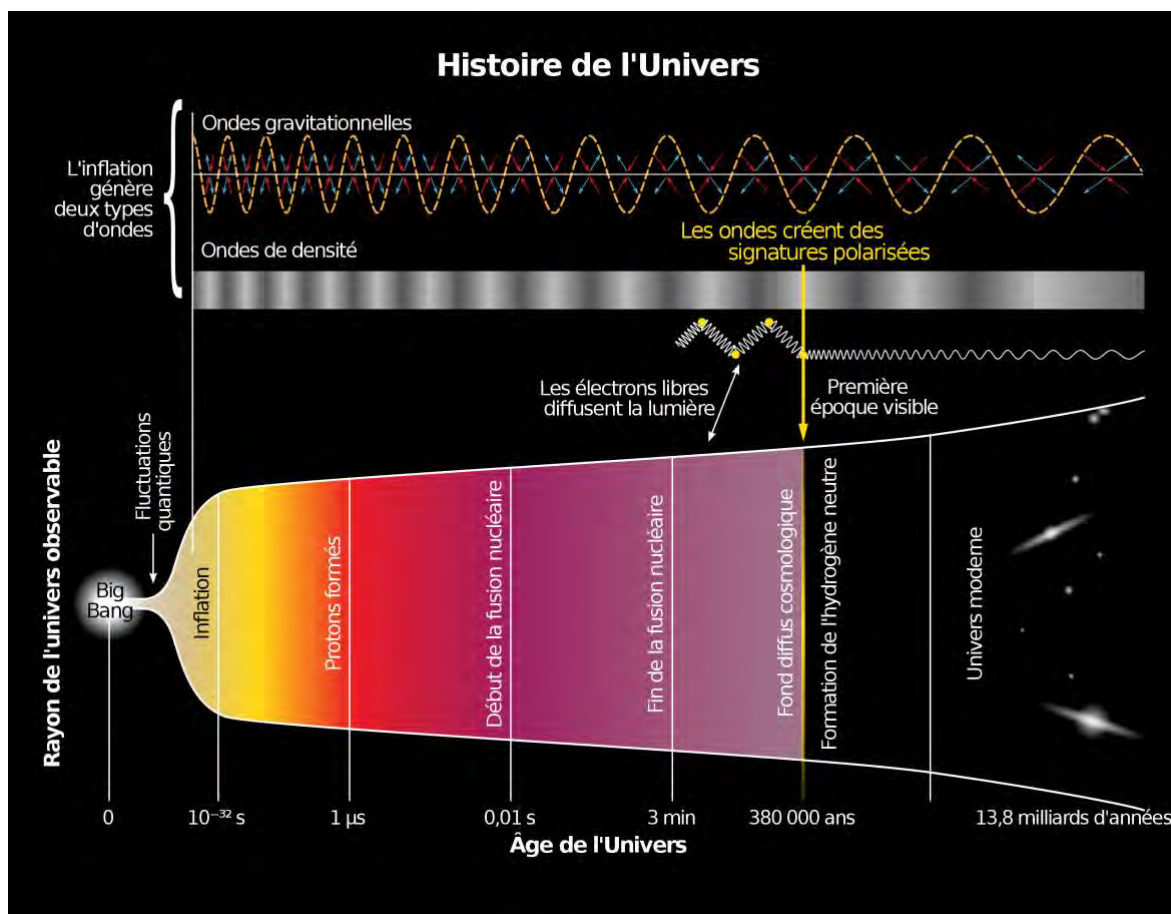
### Avenir

Selon les prédictions du modèle cosmologique le plus couramment admis de nos jours, les « objets galactiques » auront une fin: c'est la mort thermique de l'Univers. Le Soleil, par exemple, s'éteindra dans 5 (à 7) milliards d'années, lorsqu'il aura consumé tout son combustible. À terme, les autres étoiles évolueront elles aussi dans des cataclysmes cosmologiques (explosions, effondrements). Déjà les naissances d'étoiles ralentissent faute de matière, qui se raréfie au fil du temps. Dans 20 milliards d'années environ, aucun astre ne s'allumera plus. L'Univers sera peuplé d'étoiles éteintes (étoiles à neutrons, naines blanches, trous noirs) et des naines rouges résiduelles. À bien plus longues échéances, les galaxies se désagrègeront dans des collisions géantes par leurs interactions gravitationnelles internes et externes. En ce qui concerne le contenant (« l'espace »), certains physiciens pensent que le processus d'expansion sera gravitationnellement ralenti et s'inversera selon le scénario du *Big Crunch*. Pour d'autres, l'expansion, qui semble à présent accélérée par la présence d'une énergie répulsive de nature inconnue (l'énergie sombre), continuera à jamais. Peu à peu, les astres éteints s'agglutineront en trous noirs. L'Univers, sans aucune structure, ne sera plus qu'un bain de photons de plus en plus froids. Toute activité dans l'Univers s'éteindra ainsi à jamais : c'est le *Big Chill*. Si au contraire la quantité d'énergie sombre croît, l'Univers continuera son expansion à une vitesse toujours plus grande pour exploser à toutes les échelles : toute la matière qui le compose (y compris les atomes) se déchirera par dilatation de l'espace. C'est le *Big Rip* (littéralement : « grand déchirement »). Certains modèles prévoient une telle fin dans 22 milliards d'années. Chacun de ces scénarii dépend donc de la quantité d'énergie sombre que contiendra l'Univers à un moment donné. Actuellement, l'état des connaissances suggère non seulement qu'il y a insuffisamment de masse et d'énergie pour provoquer ce *Big Rip*, mais que l'expansion de l'Univers semble s'accélérer et continuera donc pour toujours.

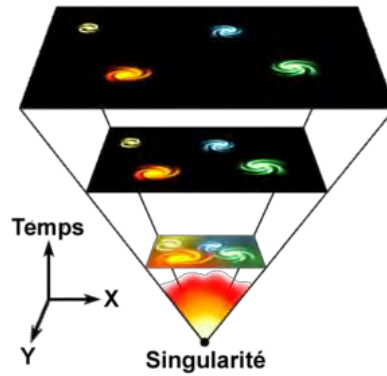
C'est en 1998 que deux équipes d'astronomes, le *Supernova Cosmology Project* et le *High-Z supernovae search team* respectivement dirigés par Saul Perlmutter et Brian P. Schmidt sont parvenues au résultat inattendu que l'expansion de l'Univers semblait s'accélérer. Ce résultat est surprenant car il n'existe aucune théorie pour l'interpréter. Il implique en effet l'existence d'une forme inconnue de matière dont la pression serait négative, avec un comportement répulsif et non pas attractif vis-à-vis de la gravitation. Cette forme hypothétique et inhabituelle de matière, de nature inconnue, communément appelée énergie sombre ou

parfois constante cosmologique, représente à l'heure actuelle un des problèmes non résolus de la cosmologie moderne. En 2011, le Prix Nobel de physique est attribué à S. Perlmutter, B. P. Schmidt et A. G. Riess pour cette découverte.

**Le Big Bang** est un modèle cosmologique utilisé par les scientifiques pour décrire l'origine et l'évolution de l'Univers. Il a été initialement proposé en 1927 par le chanoine catholique belge Georges Lemaître, qui décrivait dans les grandes lignes l'expansion de l'Univers, avant que celle-ci soit mise en évidence par l'astronome américain Edwin Hubble en 1929. Ce modèle a été désigné pour la première fois sous le terme ironique de « *Big Bang* » lors d'une émission de la BBC, *The Nature of Things* (dont le texte fut publié en 1950), par le physicien britannique Fred Hoyle, qui lui-même préférait les modèles d'état stationnaire. De façon générale, le terme « Big Bang » est associé à toutes les théories qui décrivent notre Univers comme issu d'une dilatation rapide qui fait penser (**abusivement**) à une explosion, et est également le nom associé à cette époque dense et chaude qu'a connu l'Univers il y a 13,8 milliards d'années sans que cela préjuge de l'existence d'un « instant initial » ou d'un commencement à son histoire. Le concept général du Big Bang, à savoir que l'Univers est en expansion et a été plus dense et plus chaud par le passé, doit sans doute être attribué au Russe Alexandre Friedmann, qui l'avait proposé en 1922, cinq ans avant Lemaître. Son assise ne fut cependant établie qu'en 1965 avec la découverte du fond diffus cosmologique, l'« éclat disparu de la formation des mondes », selon les termes de Georges Lemaître, qui attesta de façon définitive la réalité de l'époque dense et chaude de l'Univers primordial. Albert Einstein, en mettant au point la relativité générale, aurait pu déduire l'expansion de l'Univers, mais a préféré modifier ses équations en y ajoutant sa constante cosmologique, car il était persuadé que l'Univers devait être statique. Le terme de « Big Bang chaud » (« *Hot Big Bang* ») était parfois utilisé initialement pour indiquer que, selon ce modèle, l'Univers était plus chaud quand il était plus dense. Le qualificatif de « chaud » était ajouté par souci de précision, car le fait que l'on puisse associer une notion de température à l'Univers dans son ensemble n'était pas encore bien compris au moment où le modèle a été proposé, au milieu du XX<sup>e</sup> siècle.



*Frise chronologique de l'histoire de l'Univers.  
Le Big Bang marque le début de l'Univers, issu possiblement d'une singularité*



*Le Big Bang marque le début de l'Univers, issu possiblement d'une singularité*

## Introduction

La découverte de la relativité générale par Albert Einstein en 1915 marque le début de la cosmologie moderne, où il devient possible de décrire l'Univers dans son ensemble comme un système physique, son évolution à grande échelle étant décrite par la relativité générale. Einstein est d'ailleurs le premier à utiliser sa théorie fraîchement découverte, tout en y ajoutant un terme supplémentaire, la constante cosmologique, pour proposer une solution issue de la relativité générale décrivant l'espace dans son ensemble, appelée univers d'Einstein. Ce modèle introduit un concept extrêmement audacieux pour l'époque, le principe cosmologique, qui stipule que l'Homme n'occupe pas de position privilégiée dans l'Univers, ce qu'Einstein traduit par le fait que l'Univers soit homogène et isotrope, c'est-à-dire semblable à lui-même quels que soient le lieu et la direction dans laquelle on regarde. Cette hypothèse était relativement hardie, car, à l'époque, aucune observation concluante ne permettait d'affirmer l'existence d'objet extérieur à la Voie lactée, bien que le débat sur cette question existe dès cette époque (par la suite appelé le Grand Débat). Au principe cosmologique, Einstein ajoute implicitement une autre hypothèse qui paraît aujourd'hui nettement moins justifiée, celle que l'Univers est statique, c'est-à-dire n'évolue pas avec le temps. C'est cet ensemble qui le conduit à modifier sa formulation initiale en ajoutant à ses équations le terme de constante cosmologique. L'avenir lui donne tort, car dans les années 1920, Edwin Hubble découvre la nature extragalactique de certaines « nébuleuses » (aujourd'hui appelées galaxies), puis leur éloignement de la Galaxie avec une vitesse proportionnelle à leur distance : c'est la loi de Hubble. Dès lors, plus rien ne justifie l'hypothèse d'un Univers statique proposée par Einstein. Avant même la découverte de Hubble, plusieurs physiciens, dont Willem de Sitter, Georges Lemaître et Alexandre Friedmann, découvrent d'autres solutions de la relativité générale décrivant un Univers en expansion. Leurs modèles sont alors immédiatement acceptés dès la découverte de l'expansion de l'Univers. Ils décrivent ainsi un Univers en expansion depuis plusieurs milliards d'années. Par le passé, celui-ci était donc plus dense et plus chaud.

## État originel

À l'origine, l'univers est une boule hyper chaude, incroyablement dense, au sein de laquelle les notions d'espace et de temps n'existent pas. Un état que nos lois de la physique sont incapables d'expliquer. Ce noyau du futur univers ne contient rien qui nous puissions reconnaître aujourd'hui. Le plus bref de ces moments est connu sous le nom d'ère de Planck. Du faisceau d'énergie originel émerge une soupe chaude de « plasma » de quelque 10 milliards de trillions de trillions de degrés Celsius et contenant des particules et des antiparticules fondamentales. Il n'y a pas de photon donc pas de lumière. L'univers commence brutalement son expansion partout en même temps. Sa taille grandit d'un trillion de fois en un trillionième de seconde. La température chute alors à dix millions de degrés Celsius en moins d'un millionième de seconde. Les réactions qui se produisirent entre particules et antiparticules donnent naissance aux premiers protons, neutrons et autres particules plus lourdes. En 100 secondes, alors que l'univers atteint une largeur de plusieurs centaines d'années lumière, les noyaux de presque tous les atomes d'hydrogène et d'hélium se forment. S'ensuit une période de plusieurs milliers d'années durant lesquelles l'univers poursuit son expansion et se refroidit de facto. Mais l'ensemble est trop chargé en énergie pour que les particules aient pu s'associer pendant suffisamment longtemps afin de produire les atomes. La matière, élaborée dans les énormes chaudrons que sont les étoiles, apparaît bien plus tard.



## Big Bang ou état stationnaire ?

La découverte de l'expansion de l'Univers prouve que celui-ci n'est pas statique, mais laisse place à plusieurs interprétations possibles :

- soit il y a conservation de la matière (hypothèse *a priori* la plus réaliste), et donc dilution de celle-ci dans le mouvement d'expansion, et, dans ce cas, l'Univers était plus dense par le passé : c'est le Big Bang;
- soit on peut imaginer, à l'inverse, que l'expansion s'accompagne d'une création (voire d'une disparition) de matière. Dans ce cadre-là, l'hypothèse la plus esthétique est d'imaginer un phénomène de création continue de matière contrebalançant exactement sa dilution par l'expansion. Un tel Univers serait alors stationnaire.

Dans un premier temps, c'est cette seconde hypothèse qui a été la plus populaire, bien que le phénomène de création de matière ne soit pas motivé par des considérations physiques. L'une des raisons de ce succès est que dans ce modèle, appelé théorie de l'état stationnaire, l'univers est éternel. Il ne peut donc y avoir de conflit entre l'âge de celui-ci et l'âge d'un objet céleste quelconque. À l'inverse, dans l'hypothèse du Big Bang, l'Univers a un âge fini, que l'on déduit directement de son taux d'expansion (voir équations de Friedmann). Dans les années 1940, le taux d'expansion de l'Univers était très largement surestimé, ce qui conduisait à une importante sous-estimation de l'âge de l'Univers. Or diverses méthodes de datation de la Terre indiquaient que celle-ci était plus vieille que l'âge de l'Univers estimé par son taux d'expansion. Les modèles de type Big Bang étaient donc en difficulté vis-à-vis de telles observations. Ces difficultés ont disparu suite à une réévaluation plus précise du taux d'expansion de l'Univers.

### Preuves observationnelles

Deux preuves observationnelles décisives ont donné raison aux modèles de Big Bang : il s'agit de la détection du fond diffus cosmologique, rayonnement de basse énergie (domaine micro-onde) vestige de l'époque chaude de l'histoire de l'univers, et la mesure de l'abondance des éléments légers, c'est-à-dire des abondances relatives de différents isotopes de l'hydrogène, de l'hélium et du lithium qui se sont formés pendant la phase chaude primordiale.

Ces deux observations remontent au début de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, et ont assis le Big Bang comme le modèle décrivant l'univers observable. Outre la cohérence quasi parfaite du modèle avec tout un autre ensemble d'observations cosmologiques effectuées depuis, d'autres preuves relativement directes sont venues s'ajouter : l'observation de l'évolution des populations galactiques, et la mesure du refroidissement du fond diffus cosmologique depuis plusieurs milliards d'années.

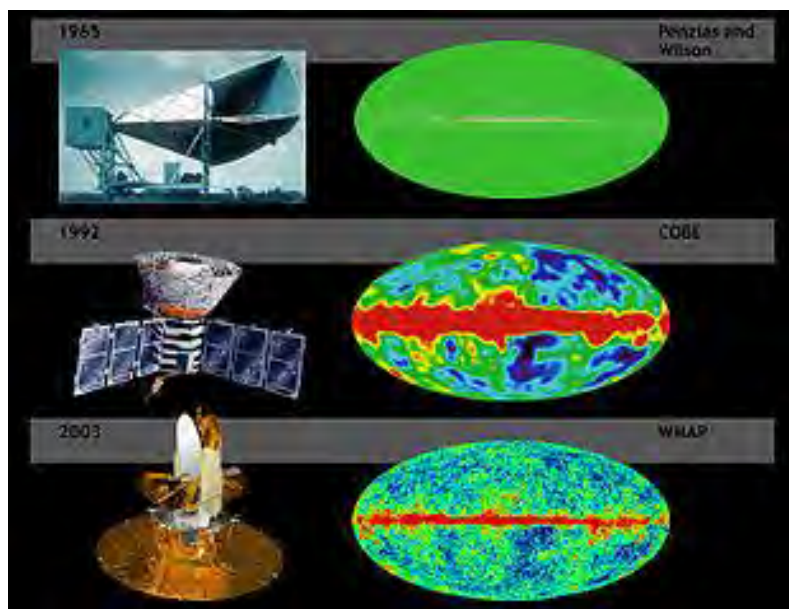
### Le fond diffus cosmologique

L'expansion induit naturellement que l'Univers a été plus dense par le passé. À l'instar d'un gaz qui s'échauffe quand on le comprime, l'Univers devait aussi être plus chaud par le passé. Cette possibilité semble évoquée pour la première fois en 1934 par Georges Lemaître, mais n'est réellement étudiée qu'à partir des années 1940. Selon l'étude de George Gamow (entre autres), l'Univers doit être rempli d'un rayonnement qui perd de l'énergie du fait de l'expansion, selon un processus semblable à celui du décalage vers le rouge du rayonnement des objets astrophysiques distants. Gamow réalise en effet que les fortes densités de l'Univers primordial doivent avoir permis l'instauration d'un équilibre thermique entre les atomes, et par suite l'existence d'un rayonnement émis par ceux-ci. Ce rayonnement devait être d'autant plus intense que l'Univers était dense, et devait donc encore exister aujourd'hui, bien que considérablement moins intense. Gamow fut le premier (avec Ralph Alpher et Robert C. Herman) à réaliser que la température actuelle de ce rayonnement pouvait être calculée à partir de la connaissance de l'âge de l'Univers, la densité de matière, et l'abondance d'hélium. Ce rayonnement est appelé aujourd'hui fond diffus cosmologique, ou parfois rayonnement fossile. Il correspond à un rayonnement de corps noir à basse température (2,7 kelvins), conformément aux prédictions de Gamow. Sa découverte, quelque peu fortuite, est due à Arno Allan Penzias et Robert Woodrow Wilson en 1965, qui seront récompensés par le Prix Nobel de physique en 1978.

L'existence d'un rayonnement de corps noir est facile à expliquer dans le cadre du modèle du Big Bang : par le passé, l'Univers est très chaud et baigne dans un rayonnement intense. Sa densité, très élevée, fait que les interactions entre matière et rayonnement sont très nombreuses, ce qui a pour conséquence que le rayonnement est thermalisé, c'est-à-dire que son spectre électromagnétique est celui d'un corps noir.

L'existence d'un tel rayonnement dans la théorie de l'état stationnaire est par contre quasiment impossible à justifier (bien que ses rares tenants affirment le contraire).

Bien que correspondant à un rayonnement à basse température et peu énergétique, le fond diffus cosmologique n'en demeure pas moins la plus grande forme d'énergie électromagnétique de l'Univers : près de 96 % de l'énergie existant sous forme de photons est dans le rayonnement fossile, les 4 % restants résultant du rayonnement des étoiles (dans le domaine visible) et du gaz froid dans les galaxies (en infrarouge). Ces deux autres sources émettent des photons certes plus énergétiques, mais nettement moins nombreux.



*Le fond diffus cosmologique, découvert en 1965 est le témoin le plus direct du Big Bang.*

*Depuis, ses fluctuations ont été étudiées par les sondes spatiales COBE (1992), WMAP (2003) et Planck (2009)*

Dans la théorie de l'état stationnaire, l'existence du fond diffus cosmologique est supposée résulter d'une thermalisation du rayonnement stellaire par d'hypothétiques aiguillettes de fer microscopiques, un tel modèle s'avère en contradiction avec les données observables, tant en termes d'abondance du fer qu'en termes d'efficacité du processus de thermalisation (il est impossible d'expliquer dans ce cadre que le fond diffus cosmologique soit un corps noir quasiment parfait) ou d'isotropie (on s'attendrait à ce que la thermalisation soit plus ou moins efficace selon la distance aux galaxies). La découverte du fond diffus cosmologique fut historiquement la preuve décisive du Big Bang.

### **La nucléosynthèse primordiale**

Dès la découverte de l'interaction forte et du fait que c'était elle qui était la source d'énergie des étoiles, s'est posée la question d'expliquer l'abondance des différents éléments chimiques dans l'Univers. Au tournant des années 1950 deux processus expliquant cette abondance étaient en compétition : la nucléosynthèse stellaire et la nucléosynthèse primordiale. Des tenants de l'idée d'état stationnaire comme Fred Hoyle supposaient que de l'hydrogène était produit constamment au cours du temps, et que celui-ci était peu à peu transformé en hélium puis en éléments plus lourds au cœur des étoiles. La fraction d'hélium ou des autres éléments lourds restait constante au cours du temps car la proportion d'hélium augmentait du fait de la nucléosynthèse, mais diminuait en proportion semblable du fait de la création d'hydrogène. À l'inverse, les tenants du Big Bang supposaient que tous les éléments, de l'hélium à l'uranium, avaient été produits lors de la phase dense et chaude de l'univers primordial. Le modèle actuel emprunte aux deux hypothèses : D'après celle-ci, l'hélium et le lithium ont effectivement été produits pendant la nucléosynthèse primordiale, mais les éléments plus lourds, comme le carbone ou l'oxygène, ont été créés plus tard au cœur des étoiles (nucléosynthèse stellaire). La principale preuve de cela vient de l'étude de l'abondance des éléments dits « légers » (hydrogène, hélium, lithium) dans les quasars lointains. D'après le modèle du Big Bang, leurs abondances relatives dépendent exclusivement d'un seul paramètre, à savoir le rapport de la densité de photons à la densité de baryons, qui est quasi constant depuis la nucléosynthèse primordiale. À partir de ce seul paramètre, que l'on peut d'ailleurs mesurer par d'autres méthodes, on peut

expliquer l'abondance des deux isotopes de l'hélium ( $^3\text{He}$  et  $^4\text{He}$ ) et de celle du lithium ( $^7\text{Li}$ ). On observe également une augmentation de la fraction d'hélium au sein des galaxies proches, signe de l'enrichissement progressif du milieu interstellaire par les éléments synthétisés par les étoiles.

### **L'évolution des galaxies**

Le modèle du Big Bang présuppose que l'Univers ait été par le passé dans un état bien plus homogène qu'aujourd'hui. La preuve en est apportée par l'observation du fond diffus cosmologique dont le rayonnement est extraordinairement isotrope : les écarts de température ne varient guère plus d'un cent-millième de degré selon la direction d'observation.

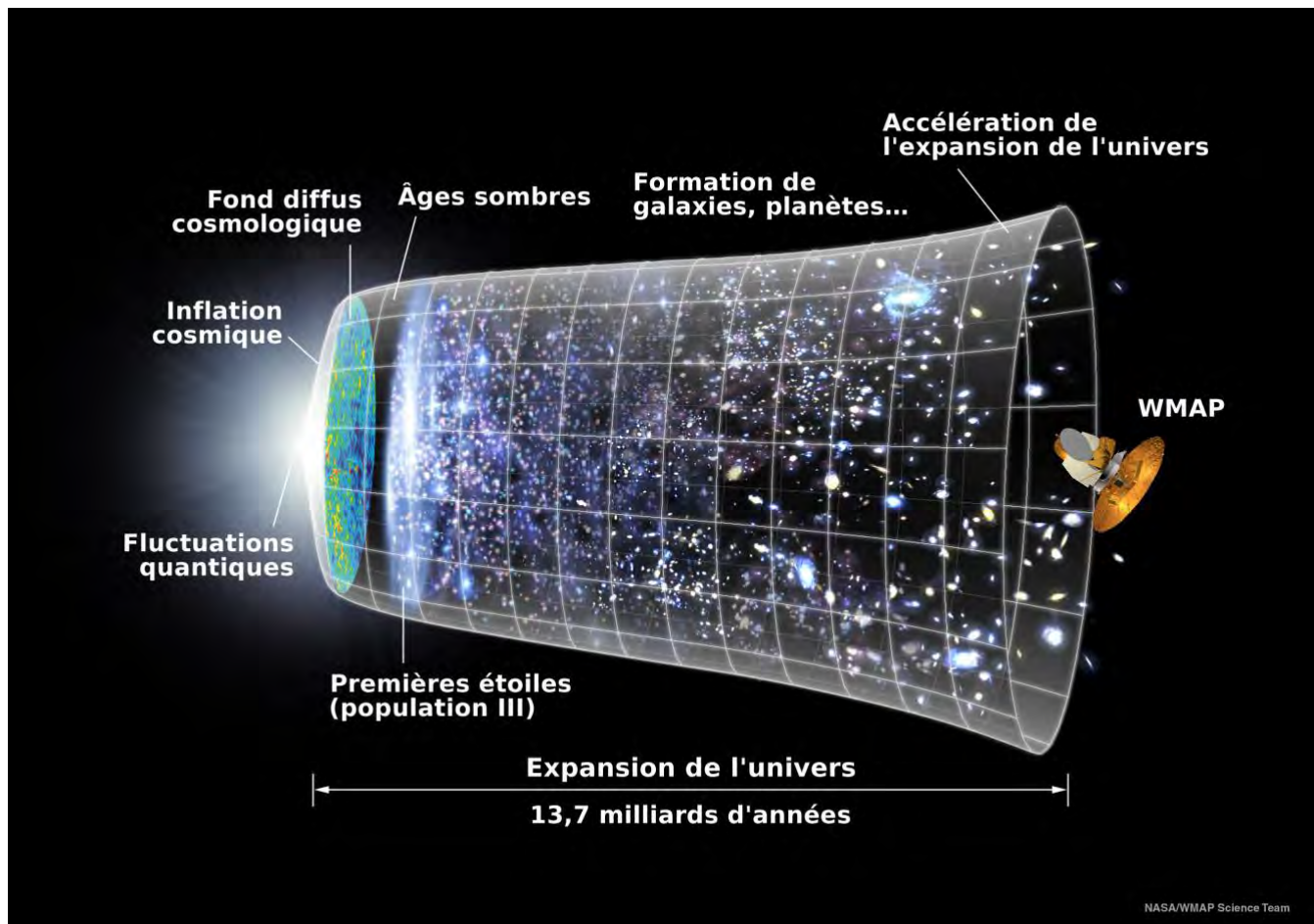
Il est donc supposé que les structures astrophysiques (galaxies, amas de galaxies) n'existaient pas à l'époque du Big Bang mais se sont peu à peu formées. Le processus à l'origine de leur formation est d'ailleurs connu depuis les travaux de James Jeans en 1902 : c'est l'instabilité gravitationnelle. Le Big Bang prédit donc que les galaxies que nous observons se sont formées quelque temps après le Big Bang, et d'une manière générale que les galaxies du passé ne ressemblaient pas exactement à celles que l'on observe dans notre voisinage. Comme la lumière voyage à une vitesse finie, il suffit de regarder des objets lointains pour voir à quoi ressemblait l'univers par le passé. L'observation des galaxies lointaines, qui d'après la loi de Hubble ont un grand décalage vers le rouge montre effectivement que les galaxies primordiales étaient assez différentes de celles d'aujourd'hui : les interactions entre galaxies étaient plus nombreuses, les galaxies massives moins nombreuses, ces dernières étant apparues plus tard des suites des phénomènes de fusion entre galaxies. De même, la proportion de galaxies spirale, elliptique et irrégulière varie au cours du temps. Toutes ces observations sont relativement délicates à effectuer, en grande partie car les galaxies lointaines sont peu lumineuses et nécessitent des moyens d'observation très performants pour être bien observées. Depuis la mise en service du télescope spatial Hubble en 1990 puis des grands observatoires au sol VLT, Keck, Subaru, l'observation des galaxies à grand redshift a permis de vérifier les phénomènes d'évolution des populations galactiques prédits par les modèles de formation et d'évolution des galaxies dans le cadre des modèles du Big Bang. L'étude des toutes premières générations d'étoiles et de galaxies demeure un des enjeux majeurs de la recherche astronomique du début du XXI<sup>e</sup> siècle.

### **La mesure de la température du fond diffus cosmologique à grand décalage vers le rouge**

En décembre 2000, Raghunathan Srianand, Patrick Petitjean et Cédric Ledoux ont mesuré la température du fond diffus cosmologique baignant un nuage interstellaire dont ils ont observé l'absorption du rayonnement émis par le quasar d'arrière-plan PKS 1232+0815, situé à un décalage vers le rouge de 2,57. L'étude du spectre d'absorption permet de déduire la composition chimique du nuage, mais aussi sa température si l'on peut détecter les raies correspondant à des transitions entre différents niveaux excités de divers atomes ou ions présents dans le nuage (dans le cas présent, du carbone neutre). La principale difficulté dans une telle analyse est d'arriver à séparer les différents processus physiques pouvant peupler les niveaux excités des atomes. Les propriétés chimiques de ce nuage, ajoutées à la très haute résolution spectrale de l'instrument utilisé (le spectrographe UVES du Very Large Telescope) ont pour la première fois permis d'isoler la température du rayonnement de fond. Srianand, Petitjean et Ledoux ont trouvé une température du fond diffus cosmologique comprise entre 6 et 14 kelvins, en accord avec la prédiction du Big Bang, de 9,1 K, étant donné que le nuage est situé à un décalage vers le rouge de 2,33771.

### **Chronologie de l'histoire de l'Univers : L'Univers aujourd'hui (+ 13,8 milliards d'années)**

L'Univers est à l'heure actuelle extrêmement peu dense (quelques atomes par mètre cube, voir l'article densité critique) et froid (2,73 kelvins, soit  $-271\text{ }^\circ\text{C}$ ). En effet, s'il existe des objets astrophysiques très chauds (les étoiles), le rayonnement ambiant dans lequel baigne l'Univers est très faible. Cela provient du fait que la densité d'étoiles est extrêmement faible dans l'Univers : la distance moyenne d'un point quelconque de l'univers à l'étoile la plus proche est immense. L'observation astronomique nous apprend de plus que les étoiles ont existé très tôt dans l'histoire de l'Univers : moins d'un milliard d'années après le Big Bang, étoiles et galaxies existaient déjà en nombre. Cependant, à des époques encore plus reculées elles n'existaient pas encore. Si tel avait été le cas, le fond diffus cosmologique porterait les traces de leur présence.



*Le scénario de l'expansion de l'Univers depuis le Big Bang jusqu'à nos jours*

Du fait de l'expansion, l'Univers était par le passé plus dense et plus chaud. La chronologie du Big Bang revient essentiellement à déterminer à rebours l'état de l'Univers à mesure que sa densité et sa température augmentent dans le passé.

### **La recombinaison (+ 380 000 ans)**

380 000 ans après le Big Bang, alors que l'Univers est mille fois plus chaud et un milliard de fois plus dense qu'aujourd'hui, les étoiles et les galaxies n'existaient pas encore. Ce moment marque l'époque où l'Univers est devenu suffisamment peu dense pour que la lumière puisse s'y propager, essentiellement grâce au fait que le principal obstacle à sa propagation était la présence d'électrons libres. Lors de son refroidissement, l'Univers voit les électrons libres se combiner aux noyaux atomiques pour former les atomes. Cette époque porte pour cette raison le nom de recombinaison. Comme elle correspond aussi au moment où l'Univers a permis la propagation de la lumière, on parle aussi de découplage entre matière et rayonnement. La lueur du fond diffus cosmologique a donc pu se propager jusqu'à nous depuis cette époque.

### **La nucléosynthèse primordiale (+ 3 minutes)**

Moins de 380 000 ans après le Big Bang, l'Univers est composé d'un plasma d'électrons et de noyaux atomiques. Quand la température est suffisamment élevée, les noyaux atomiques eux-mêmes ne peuvent exister. On est alors en présence d'un mélange de protons, de neutrons et d'électrons. Dans les conditions qui règnent dans l'Univers primordial, ce n'est que lorsque sa température descend en dessous de 0,1 MeV (soit environ un milliard de degrés) que les nucléons peuvent se combiner pour former des noyaux atomiques. Il n'est cependant pas possible de fabriquer ainsi des noyaux atomiques lourds plus gros que le lithium. Ainsi, seuls les noyaux d'hydrogène, d'hélium et de lithium sont produits lors de cette phase qui commence environ une seconde après le Big Bang et qui dure environ trois minutes. C'est ce que l'on appelle la nucléosynthèse primordiale, dont la prédiction, la compréhension et l'observation des conséquences représentent un des premiers accomplissements majeurs de la cosmologie moderne.



## L'annihilation électrons-positrons

Peu avant la nucléosynthèse primordiale (qui débute à 0,1 MeV), la température de l'Univers dépasse 0,5 MeV (cinq milliards de degrés), correspondant à l'énergie de masse des électrons. Au-delà de cette température, interactions entre électrons et photons peuvent spontanément créer des paires d'électron-positrons. Ces paires s'annihilent spontanément mais sont sans cesse recrées tant que la température dépasse le seuil de 0,5 MeV. Dès qu'elle descend en dessous de celui-ci, la quasi-totalité des paires s'annihilent en photons, laissant place au très léger excès d'électrons issus de la baryogenèse (voir ci-dessous).

## Le découplage des neutrinos

Peu avant cette époque, la température est supérieure à 1 MeV (dix milliards de degrés), ce qui est suffisant pour qu'électrons, photons et neutrinos aient de nombreuses interactions. Ces trois espèces sont à l'équilibre thermique à des températures plus élevées. Quand l'Univers refroidit, électrons et photons continuent à interagir, mais plus les neutrinos, qui cessent également d'interagir entre eux. À l'instar du découplage mentionné plus haut qui concernait les photons, cette époque correspond à celle du découplage des neutrinos. Il existe donc un fond cosmologique de neutrinos présentant des caractéristiques semblables à celles du fond diffus cosmologique. L'existence de ce fond cosmologique de neutrinos est attestée indirectement par les résultats de la nucléosynthèse primordiale, puisque ceux-ci y jouent un rôle indirect. La détection directe de ce fond cosmologique de neutrinos représente un défi technologique extraordinairement difficile, mais son existence n'en est aucunement remise en cause.

## La baryogénèse

La physique des particules repose sur l'idée générale, étayée par l'expérience, que les diverses particules élémentaires et interactions fondamentales ne sont que des aspects différents d'entités plus élémentaires (par exemple, l'électromagnétisme et la force nucléaire faible peuvent être décrits comme deux aspects d'une seule interaction, l'interaction électrofaible). Plus généralement, il est présumé que les lois de la physique et par la suite l'Univers dans son ensemble sont dans un état plus « symétrique » à plus haute température. On considère ainsi que par le passé, matière et antimatière existaient en quantités strictement identiques dans l'Univers. Les observations actuelles indiquent que l'antimatière est quasiment absente dans l'univers observable. La présence de matière est donc le signe qu'à un moment donné s'est formé un léger excès de matière par rapport à l'antimatière. Lors de l'évolution ultérieure de l'Univers, matière et antimatière se sont annihilées en quantités strictement égales, laissant derrière elles le très léger surplus de matière qui s'était formé. Comme la matière ordinaire est formée de particules appelées baryons, la phase où cet excès de matière s'est formé est appelée baryogenèse. Très peu de choses sont connues sur cette phase ou sur le processus qui s'est produit alors. Par exemple l'échelle de température où elle s'est produite varie, selon les modèles, de  $10^3$  à  $10^{16}$  GeV (soit entre  $10^{16}$  et  $10^{29}$  kelvins...). Les conditions nécessaires pour que la baryogenèse se produise sont appelées conditions de Sakharov, à la suite des travaux du physicien russe Andreï Sakharov en 1967.

## L'ère de grande unification

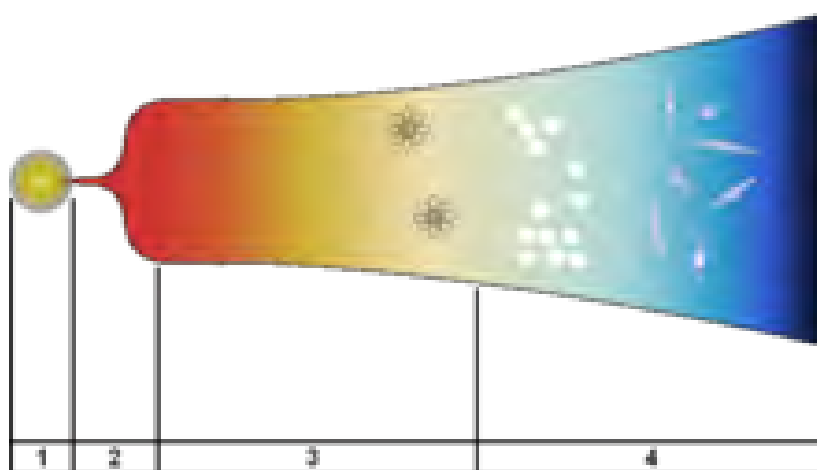
Un nombre croissant d'indications suggère que les forces électromagnétiques, faible et forte ne sont que des aspects différents d'une seule et unique interaction. Celle-ci est en général appelée théorie grand unifiée (« GUT » en anglais, pour *Grand Unified Theory*), ou grande unification. On pense qu'elle se manifeste au-delà de températures de l'ordre de  $10^{16}$  GeV ( $10^{29}$  kelvin). Il est donc probable que l'Univers ait connu une phase où la théorie grand unifiée était de mise. Cette phase pourrait être à l'origine de la baryogenèse, ainsi éventuellement que de la matière noire, dont la nature exacte reste inconnue.

## L'inflation cosmique

Le Big Bang amène de nouvelles questions en cosmologie. Par exemple, il suppose que l'Univers est homogène et isotrope (ce qu'il est effectivement, du moins dans la région observable), mais n'explique pas pourquoi il devrait en être ainsi. Or dans sa version naïve, il n'existe pas de mécanisme pendant le Big Bang qui provoque une homogénéisation de l'Univers (voir ci-dessous, le problème de l'horizon). La motivation initiale de l'inflation était ainsi de proposer un processus provoquant l'homogénéisation et l'isotropisation de l'Univers. L'inventeur de l'inflation est Alan Guth qui a été le premier à proposer explicitement un

scénario réaliste décrivant un tel processus. À son nom méritent aussi d'être associés ceux de François Englert et Alexei Starobinsky, qui ont également travaillé sur certaines de ces problématiques à la même époque (1980). Il a par la suite été réalisé (en 1982) que l'inflation permettait non seulement d'expliquer pourquoi l'Univers était homogène, mais aussi pourquoi il devait aussi présenter de petits écarts à l'homogénéité, comportant les germes des grandes structures astrophysiques. L'on peut montrer que pour que l'inflation résolve tous ces problèmes, elle doit avoir eu lieu à des époques extrêmement reculées et chaudes de l'histoire de l'Univers (entre  $10^{14}$  et  $10^{19}$  GeV, soit de  $10^{27}$  à  $10^{32}$  degrés...), c'est-à-dire au voisinage des époques de Planck et de grande unification. L'efficacité de l'inflation à résoudre la quasi-totalité des problèmes exhibés par le Big Bang lui a rapidement donné un statut de premier plan en cosmologie, bien que divers autres scénarios, souvent plus complexes et moins aboutis (pré Big Bang, défauts topologiques, univers ekpyrotique), aient été proposés pour résoudre les mêmes problèmes. Depuis l'observation détaillée des anisotropies du fond diffus cosmologique, les modèles d'inflation sont sortis considérablement renforcés. Leur accord avec l'ensemble des observations allié à l'élégance du concept font de l'inflation le scénario de loin le plus intéressant pour les problématiques qu'il aborde. La phase d'inflation en elle-même se compose d'une expansion extrêmement rapide de l'Univers (pouvant durer un temps assez long), à l'issue de laquelle la dilution causée par cette expansion rapide est telle qu'il n'existe essentiellement plus aucune particule dans l'Univers, mais que celui-ci est rempli d'une forme d'énergie très homogène. Cette énergie est alors convertie de façon très efficace en particules qui très vite vont se mettre à interagir et à s'échauffer. Ces deux phases qui closent l'inflation sont appelées préchauffage pour la création « explosive » de particules et réchauffage pour leur thermalisation. Si le mécanisme général de l'inflation est parfaitement bien compris (quoique de très nombreuses variantes existent), celui du préchauffage et du réchauffage le sont beaucoup moins et sont toujours l'objet de nombreuses recherches.

### L'ère de Planck — La cosmologie quantique



*Schéma simplifié du Big Bang*

- 1 : Big Bang
- 2 : Inflation
- 3 : Nucléosynthèse
- 4 : Formation des galaxies

Au-delà de la phase d'inflation, et plus généralement à des températures de l'ordre de la température de Planck, on entre dans le domaine où les théories physiques actuelles ne deviennent plus valables, car nécessitant un traitement de la relativité générale incluant les concepts de la mécanique quantique. Cette théorie de la gravité quantique, non découverte à ce jour mais qui sera peut-être issue de la théorie des cordes encore en développement, laisse à l'heure actuelle place à des spéculations nombreuses concernant l'Univers à cette époque dite ère de Planck. Plusieurs auteurs, dont Stephen Hawking, ont proposé diverses pistes de recherche pour tenter de décrire l'Univers à ces époques. Ce domaine de recherche est ce que l'on appelle la cosmologie quantique.

### Les problèmes apparents posés par le Big Bang et leurs solutions

L'étude des modèles de Big Bang révèle un certain nombre de problèmes inhérents à ce type de modèle. En l'absence de modifications, le modèle naïf du Big Bang apparaît peu convaincant, car il nécessite de supposer qu'un certain nombre de quantités physiques sont soit extrêmement grandes, soit extrêmement petites par rapport aux valeurs que l'on pourrait naïvement penser leur attribuer. En d'autres termes, le Big Bang semble nécessiter d'ajuster un certain nombre de paramètres à des valeurs inattendues pour pouvoir

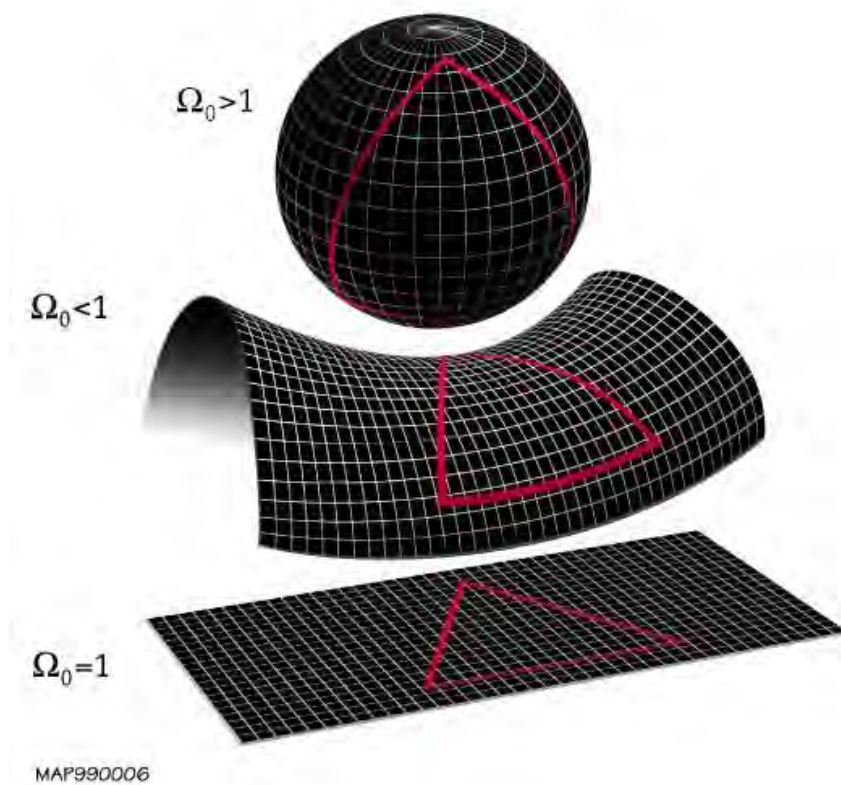
être viable. Ce type d'ajustement fin de l'univers est considéré comme problématique dans tout modèle physique (en rapport avec la cosmologie ou pas, d'ailleurs), au point que le Big Bang pourrait être considéré comme un concept posant autant de problèmes qu'il n'en résout, rendant cette solution peu attractive, malgré ses succès à expliquer nombre d'observations. Fort heureusement, des scénarios existent, en particulier l'inflation cosmique, qui, inclus dans les modèles de Big Bang, permettent d'éviter les observations initialement considérées comme étant problématiques. Il est ainsi possible d'avoir aujourd'hui une vision unifiée du contenu matériel, de la structure, de l'histoire et de l'évolution de l'univers, appelée par analogie avec la physique des particules le modèle standard de la cosmologie.

### Le problème de l'horizon

Les observations indiquent que l'univers est homogène et isotrope. Il est facile de montrer à l'aide des équations de Friedmann qu'un univers homogène et isotrope à un instant donné va le rester. Par contre, le fait que l'univers soit homogène et isotrope dès l'origine est plus difficile à justifier. À l'exception d'arguments esthétiques et de simplicité, il n'existe pas a priori de raison valable de supposer que la nature ait choisi que l'univers soit aussi homogène et isotrope que ce que l'on observe. Aucun mécanisme satisfaisant n'explique par ailleurs pourquoi il devrait exister de petits écarts à cette homogénéité, comme ceux qui sont observés dans les anisotropies du fond diffus cosmologique et qui seraient responsables de la formation des grandes structures dans l'univers (galaxie, amas de galaxies, etc.).

Cette situation est insatisfaisante et on a longtemps cherché à proposer des mécanismes qui, partant de conditions initiales relativement génériques, pourraient expliquer pourquoi l'univers a évolué vers l'état observé à notre ère. On peut en effet montrer que deux régions distantes de l'univers observable sont tellement éloignées l'une de l'autre qu'elles n'ont pas eu le temps d'échanger une quelconque information, quand bien même elles étaient bien plus proches l'une de l'autre par le passé qu'elles ne le sont aujourd'hui. Le fait que ces régions distantes présentent essentiellement les mêmes caractéristiques reste donc difficile à justifier. Ce problème est connu sous le nom de problème de l'horizon.

### Problème de la platitude



*Les différents types de géométries possibles pour l'Univers.  
Un autre problème qui apparaît quand on considère l'étude de l'évolution de  
l'Univers est celui de son éventuel rayon de courbure*

La relativité générale indique que si la répartition de matière est homogène dans l'univers, alors la géométrie de celui-ci ne dépend que d'un paramètre, appelé courbure spatiale. Intuitivement, cette quantité donne l'échelle de distance au-delà de laquelle la géométrie euclidienne (comme le théorème de Pythagore) cesse d'être valable. Par exemple, la somme des angles d'un triangle de taille gigantesque (plusieurs milliards d'années-lumière) pourrait ne pas être égale à 180 degrés. Il reste parfaitement possible que de tels effets, non observés, n'apparaissent qu'à des distances bien plus grandes que celles de l'univers observable.

Néanmoins un problème apparaît si l'on remarque que cette échelle de longueur, appelée rayon de courbure, a tendance à devenir de plus en plus petite par rapport à la taille de l'univers observable. En d'autres termes, si le rayon de courbure était à peine plus grand que la taille de l'univers observable il y a 5 milliards d'années, il devrait être aujourd'hui plus petit que cette dernière, et les effets géométriques sus-mentionnés devraient devenir visibles. En continuant ce raisonnement, il est possible de voir qu'à l'époque de la nucléosynthèse le rayon de courbure devait être immensément plus grand que la taille de l'univers observable pour que les effets dus à la courbure ne soient pas encore visibles aujourd'hui. Le fait que le rayon de courbure soit encore aujourd'hui plus grand que la taille de l'univers observable est connu sous le nom de problème de la platitude.

### **Problème des monopôles**

La physique des particules prévoit l'apparition progressive de nouvelles particules lors du refroidissement résultant de l'expansion de l'univers. Certaines sont produites lors d'un phénomène appelé transition de phase que l'on pense générique dans l'univers primordial. Ces particules, dont certaines sont appelées monopôles, ont la particularité d'être stables, extrêmement massives (ordinairement  $10^{15}$  fois plus que le proton) et très nombreuses. Si de telles particules existaient, leur contribution à la densité de l'univers devrait en fait être considérablement plus élevée que celle de la matière ordinaire.

Or, si une partie de la densité de l'univers est due à des formes de matière mal connues (voir plus bas), il n'y a certainement pas la place pour une proportion significative de monopôles. Le problème des monopôles est donc la constatation qu'il n'existe pas en proportion significative de telles particules massives dans l'univers, alors que la physique des particules prédit naturellement leur existence avec une abondance très élevée.

### **Problème de la formation des structures**

Si l'observation révèle que l'univers est homogène à grande échelle, elle révèle aussi qu'il présente des hétérogénéités importantes à plus petite échelle (planètes, étoiles, galaxies, etc.). Le fait que l'univers présente des hétérogénéités plus marquées à petite échelle n'est pas évident en soi. L'on sait expliquer comment, dans certaines circonstances, une petite hétérogénéité dans la distribution de matière peut croître jusqu'à former un objet astrophysique significativement plus compact que son environnement : c'est ce que l'on appelle le mécanisme d'instabilité gravitationnelle, ou instabilité de Jeans (du nom de James Jeans). Cependant, pour qu'un tel mécanisme se produise, il faut supposer la présence initiale d'une petite hétérogénéité, et de plus la variété des structures astrophysiques observées indique que la répartition en amplitude et en taille de ces hétérogénéités initiales suivait une loi bien précise, connue sous le nom de spectre de Harrison-Zeldovitch. Les premiers modèles de Big Bang étaient dans l'incapacité d'expliquer la présence de telles fluctuations. On parlait alors du problème de la formation des structures.

### **Solutions proposées**

#### ***Sur le problème de l'horizon***

Les problèmes de l'horizon et de la platitude ont une origine commune. Le problème de l'horizon vient du fait qu'à mesure que le temps passe, l'on a accès à des régions de plus en plus grandes, et contenant de plus en plus de matière. Par exemple, avec une expansion dictée par de la matière ordinaire, un nombre croissant de galaxies est visible au cours du temps. Il est donc surprenant que celles-ci possèdent les mêmes caractéristiques.

On se rend compte que ce problème pourrait être résolu si on imaginait qu'une certaine information sur l'état de l'univers ait pu se propager extrêmement rapidement tôt dans l'histoire de l'univers. Dans un tel cas, des régions extrêmement distantes les unes des autres pourraient avoir échangé suffisamment



d'information pour qu'il soit possible qu'elles soient dans des configurations semblables. La relativité restreinte stipule cependant que rien ne peut se déplacer plus vite que la lumière, aussi paraît-il difficilement imaginable que le processus proposé soit possible.

Néanmoins, si on suppose que l'expansion de l'univers est très rapide et se fait à taux d'expansion constant, alors on peut contourner la limitation de la relativité restreinte. En effet, dans un tel cas, la distance entre deux régions de l'univers croît exponentiellement au cours du temps, tandis que la taille de l'univers observable reste constante. Une région initialement très petite et homogène va donc avoir la possibilité de prendre une taille démesurée par rapport à la région de l'univers qui est observable. Quand cette phase à taux d'expansion constant s'achève, la région homogène de l'univers dans laquelle nous nous trouvons peut alors être immensément plus grande que celle qui est accessible à nos observations. Quand bien même la phase d'expansion classique reprend son cours, il devient naturel d'observer un univers homogène sur des distances de plus en plus grandes, tant que les limites de la région homogène initiale ne sont pas atteintes. Un tel scénario nécessite que l'expansion de l'univers puisse se faire à taux constant, ou plus généralement de façon accélérée (la vitesse à laquelle deux régions distantes s'éloignent doit croître avec le temps). Les équations de Friedmann stipulent que cela est possible, mais au prix de l'hypothèse qu'une forme de matière atypique existe dans l'univers (elle doit avoir une pression négative).

### ***Sur le problème de la platitude***

Le problème de la platitude peut se résoudre de façon essentiellement identique. Initialement, le problème vient du fait que le rayon de courbure croît moins vite que la taille de l'univers observable. Or cela peut ne plus être vrai si la loi qui gouverne l'expansion est différente de celle qui gouverne l'expansion d'un univers empli de matière ordinaire. Si en lieu et place de celle-ci l'on imagine qu'une autre forme de matière aux propriétés atypiques existe (que sa pression soit négative), alors on peut montrer que dans un tel cas, le rayon de courbure va croître plus vite que la taille de l'univers observable. Si une telle phase d'expansion s'est produite dans le passé et a duré suffisamment longtemps, alors il n'est plus surprenant que le rayon de courbure ne soit pas mesurable.

### ***Sur le problème des monopôles***

Enfin, le problème des monopôles est naturellement résolu avec une phase d'expansion accélérée, car celle-ci a tendance à diluer toute la matière ordinaire de l'univers. Cela amène un nouveau problème : la phase d'expansion accélérée laisse un univers homogène, spatialement plat, sans reliques massives, mais vide de matière. Il faut donc repeupler l'univers avec de la matière ordinaire à l'issue de cette phase d'expansion accélérée. Le scénario de l'inflation cosmique, proposé par Alan Guth au début des années 1980 répond à l'ensemble de ces critères. La forme de matière atypique qui cause la phase d'expansion accélérée est ce que l'on appelle un champ scalaire (souvent appelé inflaton dans ce contexte), qui possède toutes les propriétés requises. Il peut être à l'origine du démarrage de cette phase accélérée si certaines conditions favorables génériques se trouvent réunies en un endroit de l'univers. À l'issue de cette phase d'expansion accélérée, c'est le champ scalaire lui-même responsable de cette phase d'expansion qui devient instable et se désintègre en plusieurs étapes en particules du modèle standard au cours d'un ensemble de processus complexes appelés préchauffage et réchauffage (voir plus haut). Les premiers modèles d'inflation souffraient d'un certain nombre de problèmes techniques, notamment les circonstances qui donnaient lieu au démarrage de la phase d'expansion accélérée et à son arrêt étaient peu satisfaisantes. Les modèles d'inflation plus récents évitent ces écueils, et proposent des scénarios tout à fait plausibles pour décrire une telle phase.

### ***Sur la formation des grandes structures***

De plus l'inflaton possède, comme toute forme de matière, des fluctuations quantiques (résultat du principe d'indétermination d'Heisenberg). Une des conséquences inattendues de l'inflation est que ces fluctuations, initialement de nature quantique, évoluent durant la phase d'expansion accélérée pour devenir des variations classiques ordinaires de densité. Par ailleurs le calcul du spectre de ces fluctuations effectué dans le cadre de la théorie des perturbations cosmologiques montre qu'il suit précisément les contraintes du spectre de Harrison-Zeldovitch.

Ainsi, l'inflation permet d'expliquer l'apparition de petits écarts à l'homogénéité de l'univers, résolvant du même coup le problème de la formation des structures susmentionnées. Ce succès inattendu de l'inflation a immédiatement contribué à en faire un modèle extrêmement attractif, d'autant que le détail des inhomogénéités créées lors de la phase d'inflation peut être confronté aux inhomogénéités existant dans l'univers actuel. L'accord remarquable entre des prédictions et les observations, observé par l'étude des données relatives aux fluctuations du fond diffus cosmologique observé entre autres par les satellites COBE et WMAP (et bientôt également par le satellite Planck), ainsi que les catalogues de galaxies comme celui réalisé par la mission SDSS est sans nul doute un des plus grands succès de la cosmologie du XX<sup>e</sup> siècle. Il n'en demeure pas moins vrai que des alternatives à l'inflation ont été proposées malgré les succès indéniables de celle-ci. Parmi ceux-ci, citons le pré Big Bang proposé entre autres par Gabriele Veneziano, et l'univers ekpyrotique. Ces modèles sont globalement considérés comme moins génératives, moins esthétiques et moins achevés que les modèles d'inflation. Ce sont donc ces derniers qui à l'heure actuelle sont de loin considérés comme les plus réalistes.

### **Le modèle standard de la cosmologie**

La construction de ce qui est désormais appelé le modèle standard de la cosmologie est la conséquence logique de l'idée du Big Bang proposée dans la première partie du XX<sup>e</sup> siècle. Ce modèle standard de la cosmologie, qui tire son nom par analogie avec le modèle standard de la physique des particules, offre une description de l'univers compatible avec l'ensemble des observations de l'univers. Il stipule en particulier les deux points suivants :

- L'univers observable est issu d'une phase dense et chaude (Big Bang), durant laquelle un mécanisme a permis à la région qui nous est accessible d'être très homogène mais de présenter de petits écarts à l'homogénéité parfaite. Ce mécanisme est probablement une phase de type inflation, quoique d'autres mécanismes aient été proposés.
- L'univers actuel est rempli de plusieurs formes de matières :
  - Les photons, c'est-à-dire les particules représentant toute forme de rayonnement électromagnétique,
  - Les neutrinos,
  - La matière baryonique, qui forme les atomes,
  - Une ou plusieurs formes de matière inconnues en laboratoire mais prédites par la physique des particules appelées matière noire, responsable entre autres de la structure des galaxies, bien plus massives que l'ensemble des étoiles qui les composent,
  - Une forme d'énergie aux propriétés inhabituelles, appelée énergie noire ou constante cosmologique, responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers observée aujourd'hui (et probablement sans rapport direct avec l'inflation).

Un très grand nombre d'observations astronomiques rendent ces ingrédients indispensables pour décrire l'univers que nous connaissons. La recherche en cosmologie vise essentiellement à déterminer l'abondance et les propriétés de ces formes de matière, ainsi qu'à contraindre le scénario d'expansion accélérée de l'univers primordial (ou d'en proposer d'autres). Trois ingrédients de ce modèle standard de la cosmologie nécessitent de faire appel à des phénomènes physiques non observés en laboratoire : l'inflation, la matière noire et l'énergie noire. Néanmoins, les indications observationnelles en faveur de l'existence de ces trois phénomènes sont telles qu'il semble extrêmement difficile d'envisager d'éviter d'y faire appel. Il n'existe de fait aucun modèle cosmologique satisfaisant s'affranchissant d'un ou plusieurs de ces ingrédients.

## **Quelques fausses idées sur le Big Bang :**

### **Le Big Bang ne se réfère pas à un instant « initial » de l'histoire de l'Univers**

Il indique seulement que celui-ci a connu une période dense et chaude. De nombreux modèles cosmologiques décrivent de façons très diverses cette phase dense et chaude. Le statut de cette phase a d'ailleurs été soumis à maints remaniements. Dans un de ses premiers modèles, Georges Lemaître proposait un état initial dont la matière aurait la densité de la matière nucléaire ( $10^{15}$  g/cm<sup>3</sup>). Lemaître considérait (à juste titre) qu'il était difficile de prétendre connaître avec certitude le comportement de la matière à de telles

densités, et supposait que c'était la désintégration de ce noyau atomique géant et instable qui avait initié l'expansion (hypothèse de l'atome primitif). Auparavant, Lemaître avait en 1931 fait remarquer que la mécanique quantique devait invariablement être invoquée pour décrire les tout premiers instants de l'histoire de l'Univers, jetant par là les bases de la cosmologie quantique, et que les notions de temps et d'espace perdaient probablement leur caractère usuel. Aujourd'hui, certains modèles d'inflation supposent par exemple un univers éternel, d'autres modèles comme celui du pré Big Bang supposent un état initial peu dense mais en contraction suivi d'une phase de rebond, d'autres modèles encore, basés sur la théorie des cordes, prédisent que l'univers observable n'est qu'un objet appelé « brane » (tiré du mot anglais « *membrane* », identique à sa traduction française) plongé dans un espace à plus de quatre dimensions (le « *bulk* »), le big bang et le démarrage de l'expansion étant dus à une collision entre deux branes (univers ekpyrotique). Cependant, c'est lors de cette phase dense et chaude que se forment les particules élémentaires que nous connaissons aujourd'hui, puis, plus tard toutes les structures que l'on observe dans l'Univers. Ainsi reste-t-il légitime de dire que l'univers est né du Big Bang, au sens où l'Univers tel que nous le connaissons s'est structuré à cette époque.

**Le Big Bang n'est pas une explosion, il ne s'est pas produit « quelque part ».** Le Big Bang ne s'est pas produit en un point d'où aurait été éjectée la matière qui forme aujourd'hui les galaxies, contrairement à ce que son nom suggère et à ce que l'imagerie populaire véhicule souvent. À l'époque du Big Bang, les conditions qui régnaient « partout » dans l'Univers (du moins la région de l'Univers observable) étaient identiques. Il est par contre vrai que les éléments de matière s'éloignaient alors très rapidement les uns des autres, du fait de l'expansion de l'Univers. Le terme de Big Bang renvoie donc à la violence de ce mouvement d'expansion, mais pas à un « lieu » privilégié. En particulier il n'y a pas de « centre » du Big Bang ou de direction privilégiée dans laquelle il nous faudrait observer pour le voir. C'est l'observation des régions lointaines de l'Univers (quelle que soit leur direction) qui nous permet de voir l'Univers tel qu'il était par le passé (car la lumière voyageant à une vitesse finie, elle nous fait voir des objets lointains tels qu'ils étaient à une époque reculée, leur état actuel nous étant d'ailleurs inaccessible) et donc de nous rapprocher de cette époque. Ce qu'il nous est donné de voir aujourd'hui n'est pas l'époque du Big Bang lui-même, mais le fond diffus cosmologique, sorte d'écho lumineux de cette phase chaude de l'histoire de l'Univers. Ce rayonnement est essentiellement uniforme quelle que soit la direction dans laquelle on l'observe, ce qui indique que le Big Bang s'est produit de façon extrêmement homogène dans les régions qu'il nous est possible d'observer. La raison pour laquelle il n'est pas possible de voir jusqu'au Big Bang est que l'Univers primordial est opaque au rayonnement du fait de sa densité élevée, de même qu'il n'est pas possible de voir directement le centre du Soleil et que l'on ne peut observer que sa surface. Voir l'article fond diffus cosmologique pour plus de détails.

### **Implications philosophiques et statut épistémologique**

L'aspect étonnamment « créationniste » que suggère le Big Bang, du moins dans son interprétation naïve, a bien sûr été à l'origine de nombreuses réflexions, y compris hors des cercles scientifiques, puisque pour la première fois était entrevue la possibilité que la science apporte des éléments de réponse à des domaines jusque-là réservés à la philosophie et la théologie. Ce point de vue sera en particulier exprimé par le pape Pie XII (voir ci-dessous). Remarquons au passage que la chronologie suggérée par le Big Bang va à l'inverse des convictions des deux grands architectes des théories de la gravitation, Isaac Newton et Albert Einstein, qui croyaient que la Création était éternelle. Dans le cas d'Einstein, toutefois, il ne semble pas avéré qu'il y avait un préconçu philosophique pour motiver cette intuition, qui pourrait être avant tout issue de motivations physiques. Lemaître élaborera un point de vue différent de celui exprimé par le Pape : la cosmologie et la science en général, n'a pas vocation à conforter ou à infirmer ce qui est du domaine du religieux (ou philosophique). Elle se contente de proposer un scénario réaliste permettant de décrire de façon cohérente l'ensemble des observations dont on dispose à un instant donné. Pour l'heure, l'interprétation des décalages vers le rouge en termes d'expansion de l'Univers est établie au-delà de tout doute raisonnable, aucune autre interprétation ne résistant à un examen sérieux, ou étant motivée par des arguments physiques pertinents, et l'existence de la phase dense et chaude est également avérée (voir plus haut).

## Critiques de la part de scientifiques

Par contre les convictions ou les réticences des acteurs qui ont participé à l'émergence du concept ont joué un rôle dans ce processus de maturation, et il a souvent été dit que les convictions religieuses de Lemaître l'avaient aidé à proposer le modèle du Big Bang, bien que cela ne repose pas sur des preuves tangibles. Notons à l'inverse que l'idée que tout l'Univers eût pu avoir été créé à un instant donné paraissait à Fred Hoyle bien plus critiquable que son hypothèse de création lente mais continue de matière dans la théorie de l'état stationnaire, ce qui est sans doute à l'origine de son rejet du Big Bang. De nombreux autres exemples de réticences sont connus chez des personnalités du monde scientifique, en particulier :

- Hannes Alfvén, prix Nobel de physique 1970 pour ses travaux sur la physique des plasmas, qui rejeta en bloc le Big Bang, préférant lui proposer sa propre théorie, l'univers plasma, reposant sur une prééminence des phénomènes électromagnétiques sur les phénomènes gravitationnels à grande échelle, théorie aujourd'hui totalement abandonnée;
- Edward Milne, qui proposa des cosmologies newtoniennes, et fut d'ailleurs le premier à le faire (quoiqu'après la découverte de la relativité générale), dans lesquelles l'expansion était interprétée comme des mouvements de galaxies dans un espace statique et minkowskien;
- De façon plus posée, Arno Allan Penzias et Robert Woodrow Wilson qui reçurent le prix Nobel de physique pour leur découverte du fond diffus cosmologique, apportant ainsi la preuve décisive du Big Bang, ont reconnu qu'ils étaient adeptes de la théorie de l'état stationnaire. Wilson déclara notamment ne pas avoir eu la certitude de la pertinence de l'interprétation cosmologique de leur découverte : « Arno et moi, bien sûr, étions très heureux d'avoir une réponse de quelque nature que ce soit à notre problème. Toute explication raisonnable nous aurait satisfait. [...] Nous nous étions habitués à l'idée d'une cosmologie de l'état stationnaire. [...] Philosophiquement, j'aimais la cosmologie de l'état stationnaire. Aussi ai-je pensé que nous devons rapporter notre résultat comme une simple mesure : au moins la mesure pourrait rester vraie après que la cosmologie derrière s'avèrerait fausse. »

Même aujourd'hui, et malgré ses succès indéniables, le Big Bang rencontre encore une opposition (quoique très faible) de la part d'une partie du monde scientifique, y compris chez certains astronomes. Parmi ceux-ci figurent ses opposants historiques comme Geoffrey Burbidge, Fred Hoyle et Jayant Narlikar, qui après avoir finalement abandonné la théorie de l'état stationnaire, en ont proposé une version modifiée, toujours basée sur la création de matière, mais avec une succession de phases d'expansion et de recontraction, la théorie de l'état quasi stationnaire, n'ayant pas rencontré de succès probant en raison de leur incapacité à faire des prédictions précises et compatibles avec les données observationnelles actuelles, notamment celles du fond diffus cosmologique. Une des critiques récurrentes du Big Bang porte sur l'éventuelle incohérence entre l'âge de l'Univers, plus jeune que celui d'objets lointains, comme cela a été le cas pour les galaxies Abell 1835 IR1916 et HUDF-JD2, mais la plupart du temps, ces problèmes d'âge résultent surtout de mauvaises estimations de l'âge de ces objets (voir les articles correspondants), ainsi qu'une sous-estimation des barres d'erreur correspondantes.

Dans le monde francophone, Jean-Claude Pecker, membre de l'académie des sciences, Jean-Marc Bonnet-Bidaud, astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique émettent des critiques sur le Big Bang. Christian Magnan, chercheur au Groupe de recherches en astronomie (GRAAL) de l'université de Montpellier continue à défendre fermement la réalité du Big Bang mais se montre néanmoins insatisfait du modèle standard de la cosmologie. Il critique notamment ce qu'il décrit comme « la soumission inconditionnelle au modèle d'Univers homogène et isotrope » (c'est-à-dire satisfaisant au Principe cosmologique) qui conduit selon lui à des difficultés. La plupart de ces critiques ne sont cependant pas étayées par des éléments scientifiques concrets, et ces personnes ne comptent pas de publications sur le sujet dans des revues scientifiques à comité de lecture. Il n'en demeure pas moins que la presse scientifique grand public se fait souvent l'écho de telles positions marginales, offrant parfois une vision faussée du domaine à ses lecteurs.

## Statut actuel

Les progrès constants dans le domaine de la cosmologie observationnelle donnent une assise unanimement considérée comme définitive au Big Bang, du moins parmi les chercheurs travaillant dans le domaine. Il n'existe d'autre part aucun modèle concurrent sérieux au Big Bang. Le seul qui ait jamais existé, la théorie



de l'état stationnaire, est aujourd'hui complètement marginal du fait de son incapacité à expliquer les observations élémentaires du fond diffus cosmologique, de l'abondance des éléments légers et surtout de l'évolution des galaxies. Ses auteurs se sont d'ailleurs finalement résignés à en proposer au début des années 1990 une version significativement différente, la théorie de l'état quasi stationnaire, qui comme son nom ne l'indique pas comporte un cycle de phases denses et chaudes, lors desquelles les conditions sont essentiellement semblables à celles du Big Bang. Il n'existe désormais pas d'argument théorique sérieux pour remettre en cause le Big Bang. Celui-ci est en effet une conséquence relativement générique de la théorie de la relativité générale qui n'a à l'heure actuelle pas été mise en défaut par les observations. Remettre en cause le Big Bang nécessiterait donc soit de rejeter la relativité générale (malgré l'absence d'éléments observationnels allant dans ce sens), soit de supposer des propriétés extrêmement exotiques d'une ou plusieurs formes de matière. Même dans ce cas il semble impossible de nier que la nucléosynthèse primordiale ait eu lieu, ce qui implique que l'Univers soit passé par une phase un milliard de fois plus chaude et un milliard de milliards de milliards de fois plus dense qu'aujourd'hui. De telles conditions rendent le terme de Big Bang légitime pour parler de cette époque dense et chaude. De plus, les seuls modèles réalistes permettant de rendre compte de la présence des grandes structures dans l'Univers supposent que celui-ci a connu une phase dont les températures étaient entre  $10^{26}$  et  $10^{29}$  fois plus élevées qu'aujourd'hui.

Cela étant, il arrive que la presse scientifique grand public se fasse parfois l'écho de telles positions marginales. Il est par contre faux de dire que l'intégralité du scénario décrivant cette phase dense et chaude est comprise. Plusieurs époques ou phénomènes en sont encore mal connus, comme en particulier celle de la baryogénèse, qui a vu se produire un léger excès de matière par rapport à l'antimatière avant la disparition de cette dernière, ainsi que les détails de la fin de la phase d'inflation (si celle-ci a effectivement eu lieu), en particulier le préchauffage et le réchauffage : si les modèles de Big Bang sont en constante évolution, le concept général est en revanche très difficilement discutable.