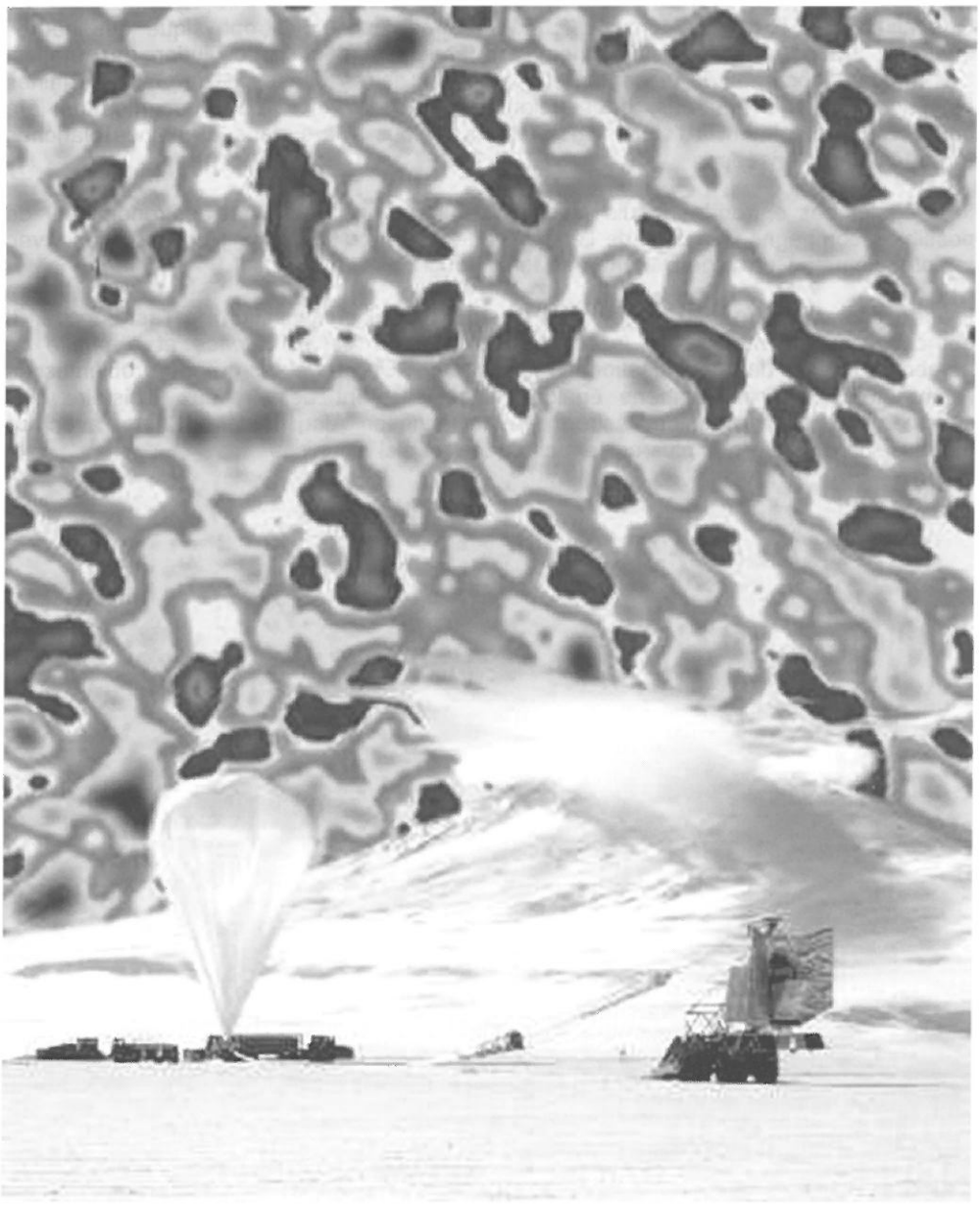


Le ciel du fond diffus (avec ses fluctuations) au-dessus du Mont Erebus : une "vue d'artiste", montage, réalisée par la collaboration Boomerang : (http://www.physics.ucsb.edu/~boomerang/press_images/index.html)

❒ Le big-bang : vrais et faux problèmes*

Marc LACHIEZE-REY

Résumé : *Depuis les années 1960, une avalanche de confirmations observationnelles du big-bang a recouvert la cosmologie, de plus en plus remarquables par leur précision. On entend pourtant, ces dernières années, évoquer des « problèmes » du big-bang, et plaider pour telle ou telle solution. Que sont ces vrais ou faux problèmes ? Comment les traiter ?*

Abstract : *The Big Bang real or false problems*. — *Since the sixties, an avalanche of confirmations by observations of the big-bang has covered cosmology each time more and more remarkable by their precision. Problems about the big bang are nevertheless mentioned these last years and this or that solution is spoken for. What are these real or false problems ? How should they be dealt with ?*

* Reproduction, avec l'accord de l'auteur, de l'article paru sous le même titre dans la revue **Planetariums 2002** éditée par ***l'Association des Planétariums de langue française***.

1. Introduction

Bientôt un siècle de physique et de cosmologie relativistes !

Les théories de la relativité ont été acceptées rapidement. Après une longue période d'indifférence et d'incompréhension, elles constituent un pilier solide de la physique d'aujourd'hui. En revanche, peu de modèles, ou de théories scientifiques, ont suscité davantage d'opposition que ceux de big-bang. Le terme même fut forgé par l'un des opposants des plus virulents, l'astrophysicien britannique **Fred Hoyle**. Il introduisit de ce fait (erreur de compréhension de sa part, ou perfide tentative pour discréditer le modèle ?) un contresens fatal qui nuit encore aujourd'hui à la compréhension de la cosmologie : le big-bang n'est pas une explosion ; il ne s'est pas déroulé en *un point* de l'espace ; il ne représente pas un phénomène qui se développe *dans l'espace* ...

Les résistances au big-bang rappellent tout à fait celles qu'il y eut à admettre le mouvement de la Terre : elles illustrent la difficulté de remettre en cause sereinement une « connaissance » datant de plusieurs millénaires, ici celle d'un univers toujours égal à lui-même. Se heurter de front à un mythe aussi établi ne constitue pas un tâche facile[1]. Les premières résistances étaient toutefois justifiées car, dans leurs débuts, ces modèles manquaient totalement de confirmations observationnelles. Pire, les estimations de l'âge de l'univers semblaient même les contredire[2] ! Par la suite, les modèles s'avérèrent exacts, et les observations erronées : petite leçon d'épistémologie à l'usage des empiristes !

Depuis les années 1960, une avalanche de confirmations observationnelles du big-bang a recouvert la cosmologie, de plus en plus remarquables par leur précision. On entend pourtant, ces dernières années, évoquer des « problèmes » du big-bang, et plaider pour telle ou telle solution. Que sont ces vrais ou faux problèmes ? Comment les traiter ?

2. Les modèles de big-bang[3]

Quelques années seulement après la découverte de la relativité générale, le physicien soviétique **Alexandre Friedmann** avait écrit les solutions mathématiques correspondant aux modèles de big-bang, mais ses travaux ne reçurent que très peu d'écho. Quelques années plus tard, le physicien belge **Georges Lemaître** redécouvrit ces solutions indépendamment. Surtout, il se rendit compte de leur pertinence pour décrire notre Univers, en particulier les observations de décalages vers le rouge de galaxies, déjà accumulées par l'astronome américain **Vesto Slipher**. Il publia ce travail en 1927, y compris une « loi de Hubble » avant la lettre : l'authentique loi de ce nom, à la base de toute la cosmologie moderne, ne fut publiée que deux ans plus tard par **Edwin Hubble**, et d'un point de vue totalement empirique[4]. En 1930, la communauté scientifique prit connaissance des

[1] Ironiquement, ce furent souvent ses opposants qui, faute d'argument, qualifièrent injustement le big-bang de mythe, plutôt que de modèle véritablement scientifique.

[2] Dans les années 1930, les modèles relativistes d'univers en évolution prédisaient un âge de quelques milliards d'années seulement, alors que l'âge de la Terre était estimé à plus de 4 milliards. Comment imaginer une planète plus âgée que l'univers qui l'abrite ?

[3] Cet article ne donne pas les équations des modèles, ni les valeurs précises des paramètres cosmologiques, ni les manières de les estimer. Tout ceci peut être trouvé dans la bibliographie.

[4] Paradoxe, Hubble, dont le nom est resté lié à la loi qui exprime l'expansion cosmique, n'en était pas du tout convaincu.

travaux de Georges Lemaître : l'expansion de l'univers devint un fait avéré, et bien interprété dans le cadre de la cosmologie relativiste.

Une fois l'expansion admise, les modèles de big-bang ne sont plus qu'une simple affaire de logique et de physique de base. Si les lois physiques sont celles que nous connaissons (une restriction qui n'est pas sans importance comme nous allons le voir), l'expansion implique une dilution de la matière et des rayonnements cosmiques ; cette dilution s'accompagne de refroidissement, ce qui implique une structuration progressive au cours de l'évolution cosmique. Les modèles de big-bang s'identifient à l'étude physique détaillée des divers processus qui constituent cette longue histoire, en fonction des lois que nous connaissons. **Lemaître** fut le premier à exprimer ce raisonnement : à cause de l'expansion, les conditions physiques se modifient dans l'univers. Il doit être en évolution, avoir une véritable histoire, que l'on peut reconstituer. Ses premières tentatives datent des années 1930, mais la communauté scientifique n'était pas prête à accepter une telle nouveauté : après l'expansion déjà indigeste, l'idée d'un univers en évolution avait du mal à passer et le mythe d'un univers toujours égal à lui même restait difficile à ébranler. Ces premiers travaux suscitèrent indifférence plutôt qu'opposition. **Lemaître** avait pourtant déjà entrevu, en visionnaire, l'importance de la physique quantique, alors dans ses débuts, pour décrire le passé reculé de l'univers.

Dans les années 1940, le développement de la physique nucléaire entraîna un intérêt nouveau pour ces modèles « d'Univers chaud » : dans le lointain passé cosmique, densité et températures élevées constituaient des conditions idéales pour le déroulement d'intéressantes réactions nucléaires. Le physicien **George Gamow** et ses collaborateurs se penchèrent sur la physique de ce passé primordial, et purent en particulier conclure qu'un intense rayonnement électromagnétique, engendré à cette époque, devait subsister aujourd'hui, refroidi. Ce fut la première prédiction observationnelle, fondamentale, des modèles de big-bang : celle de l'existence du *fond diffus cosmologique.*

La découverte de ce rayonnement[5], en 1965, rallia une grande partie de la communauté cosmologique au big-bang. Comme cela apparaît avec encore plus de force aujourd'hui, il n'existe aucune autre explication plausible à sa présence. Le big-bang prédit un spectre[6] tout à fait particulier, dont la forme de corps noir a été vérifiée avec une précision extrême par le satellite COBE. Il prédit également une très grande *isotropie* (à quelques millionièmes près), également observée. Il prédit enfin une variation de la température de ce rayonnement avec le temps (refroidissement cosmique), également vérifiée récemment.

Ces nombreuses caractéristiques du fond diffus cosmologique, observées en grands détails, confirment les prédictions du big-bang, non moins précises. Cela seul suffirait à valider les modèles de big-bang. Des expériences et des projets en très grand nombre sont toujours consacrés au fond diffus cosmologique : elles ont pour motivation la détermination de la meilleure version, au sein de la famille des modèles de big-bang, pour décrire notre Univers. Il s'agit en outre d'explorer certains phénomènes plus précis (formation des galaxies et des structures, présences d'ondes gravitationnelles, ionisation de l'univers,...) qui se sont déroulés *dans le cadre* du big-bang. Il s'agit enfin - c'est au moins une éventualité - de *compléter* les modèles de big-bang : reconstituer la physique cosmique encore plus loin dans le passé (voir ci-dessous).

Cela constitue les trois volets essentiels de la cosmologie contemporaine.

---

5 voir *Le fond diffus cosmologique*

6 la distribution de l'énergie du rayonnement en fonction de sa longueur d'onde.

Une famille très simple

Les modèles de big-bang forment une famille. Ils sont extraordinairement simples en comparaison de la diversité de l'univers physique, les plus simples que l'on puisse concevoir. Ils partagent les caractéristiques suivantes.

A. L'univers est décrit selon la relativité générale, comme un cadre géométrique (variété espace-temps) contenant diverses substances : matière et rayonnements, peut-être d'autres composantes encore à découvrir.

B. Tout ce qui se passe dans l'univers est conforme à la physique connue.

C. L'*espace* (mais pas l'espace-temps) est homogène et isotrope, en vertu du *Principe Cosmologique*. On peut imaginer d'autres modèles, conformes à la relativité générale et à notre physique, mais anisotropes ou non homogènes (par exemple les modèles *multiconnexes*[7]). Les contraintes issues des observations entraînent néanmoins qu'ils ressemblent tout à fait aux modèles de big-bang.

D. L'univers est en expansion, et cela depuis un temps suffisamment long, appelé (abusivement) âge de l'univers, et de l'ordre d'une quinzaine de milliards d'années[8].

Cet ensemble de déterminations caractérise les modèles de big-bang. L'expansion cosmique dilue et refroidit le contenu de l'univers : tout était dense et chaud dans l'univers ancien, d'autant plus que l'on remonte dans le passé. C'est la caractéristique essentielle du big-bang.

Les observations nous indiquent à quel taux se déroule cette expansion ; il est exprimé par la constante de Hubble, que nous pensons connaître aujourd'hui (68 km/s/Mpc) avec une précision meilleure que 10%.

Mais l'expansion va-t-elle s'accélérer ou ralentir ? Peut-on en connaître le taux, non pas présent, mais passé ou futur ? Les observations ne fournissent que des indices incomplets. On ne peut conclure sans un cadre théorique précis.

Fondements

• La version originelle du big-bang résulte d'une application stricte, et conservative, de nos lois physiques : on suppose l'existence de la matière et des rayonnements connus, avec leurs lois établies aujourd'hui, et rien d'autre. On peut alors montrer que l'expansion cosmique se poursuit depuis une durée finie que l'on appelle *âge de l'univers*.

L'équation d'**Einstein**, équation fondamentale de la relativité générale, s'adapte en cosmologie pour donner les *équations de Friedmann*. Celles-ci expriment comment la géométrie et la dynamique de l'univers sont influencées par son contenu matériel. En fonction de ce que l'on connaît, on peut estimer que l'expansion fut constamment décélérée et que l'âge de l'univers se situe entre 10 et 20 milliards d'années.

---

[7] Voir l'article de Jean-Pierre Luminet l'année dernière.

[8] Ce chiffre peut être modifié sans que les caractéristiques des modèles de big-bang soient remises en cause. Les modèles où l'univers est en expansion depuis une durée infinie (pas de big-bang) sont exclus par les observations.

Cette version originelle des modèles de big-bang se heurte à deux difficultés : tout d'abord, la poursuite du raisonnement dans le passé mène à une densité et une température infinies : une *singularité*, à laquelle on ne saurait appliquer notre physique, et dont les cosmologues ont longtemps cherché à se débarrasser (voir *La physique et l'infini*). Aujourd'hui, on pense que la solution provient de l'influence de phénomènes quantiques en cosmologie. Ensuite, des observations récentes (voir plus bas) semblent indiquer une expansion *accélérée*, et non pas décélérée. Cela exige une modification au scénario original.

• **Hoyle**, refusant l'idée d'un univers en évolution, avait proposé un modèle concurrent, *d'univers stationnaire*. Séduisant par bien des côtés[9], ce modèle exigeait pourtant une modification à nos lois physiques : l'invocation d'un processus de *création continue de matière*, à partir de rien. Si l'hypothèse paraissait à l'époque relativement gratuite et hétérodoxe, il faut reconnaître qu'elle rentre aujourd'hui dans la liste des possibilités que les physiciens sont prêts à admettre (voir ci-dessous). Ces modèles furent cependant abandonnés, car incompatibles avec les observations[10].

Depuis lors, notre connaissance de la physique quantique s'est affermie. Nous estimons que, comme l'avait pressenti Lemaître, elle a dû jouer un rôle important dans les instants reculés de l'évolution cosmique. La reconstitution de la physique des instants les plus reculés nous confronte à des conditions physiques extrêmes, que nos théories physiques établies sont impuissantes à décrire. Nous savons que des processus de nature quantique ont dû jouer un rôle dans les périodes reculées mais, bloqués par la déficience de nos connaissances, nous ne savons pas les aborder.

Vers l'inconnu

Plus on recule dans le passé cosmique, plus les conditions physiques diffèrent de celles d'aujourd'hui : on doit invoquer physique atomique, physique nucléaire, physique des particules, ... Les points de suspension indiquent des conditions où la densité et la température sont si élevées que nous ne savons même pas quelle physique appliquer. Les particules interagissaient sans doute de manière différente d'aujourd'hui ; des espèces inconnues étaient peut-être présentes. Tant que nous ne disposons pas de lois physiques applicables à cette époque, la reconstitution de l'histoire de l'univers bute sur la limite de nos connaissances.

Je distinguerai deux niveaux à notre impuissance : le *faiblement* et le *fortement* (pour ne pas dire totalement) inconnus. Le faiblement inconnu (*l'ère semi classique*, voir ci-dessous) correspond à une époque d'un passé très lointain ; le *fortement* inconnu (*ère de Planck*) encore davantage.

Durant la période *semi-classique*, la *matière* est décrite de manière quantique[11], mais pas la *géométrie* de l'espace-temps : l'évolution cosmique reste gouvernée par la relativité générale (ou par une théorie qui y ressemble). Mais la nature et le comportement de la matière pourraient nous réserver des surprises : interactions différentes, unifiées davantage ; autres espèces de particules ou de champs (notamment celles qui pourraient constituer une « énergie sombre », voir ci-dessous) ; création de particules ; rôle important de l'énergie

[9] Ce modèle était compatible avec l'expansion cosmique, mais il décrivait un univers qui restait pourtant identique à lui-même avec le temps.

[10] Avec la distribution des objets dans l'univers, mais surtout avec la présence et les caractéristiques du fond diffus cosmologique.

[11] Les incertitudes caractérisant cette période proviennent du fait que la physique quantique ordinaire est écrite dans le cadre d'un espace-temps sans courbure, sans expansion. Son adaptation à un espace-temps courbe, tel notre univers réel, reste problématique.

du vide (inflation) ; transitions de phase cosmologiques et défauts topologiques (cordes cosmiques)... peut-être d'autres effets encore non soupçonnés. Tout ceci reste très incertain, et encore très mal décrit. Malgré le côté étrange de ces effets, tout rentre (probablement) dans le cadre de l'histoire racontée par le big-bang, et apporte même peut-être une compréhension supplémentaire de certains aspects de notre univers.

Il n'en est pas ainsi de la période plus extrême qui précédait : des effets quantiques devaient affecter non seulement le *contenu* de l'univers, mais aussi sa *géométrie* elle-même. L'espace-temps aurait été « fluctuant », comme tout ce qui est quantique. Nous ne savons pratiquement rien dire de cette période d'incertitude forte, et la reconstitution du passé bute sur la *barrière de Planck*, limite résultant de notre ignorance. Nous devons considérer que les modèles de big-bang décrivent l'histoire de l'univers depuis ce moment qui marque le début de leur validité, jusqu'à aujourd'hui.

Le problème de la singularité est éliminé, au prix de la reconnaissance du caractère *incomplet* des modèles de big-bang. Nous ne savons rien de ce qui s'est déroulé avant le big-bang (peut-être ne s'est-il rien déroulé). Impossible, en particulier, d'évoquer dans ce contexte un début, une origine, une création du monde. Nous espérons disposer un jour d'une physique plus efficace, qui s'appliquerait à l'ère de Planck (qui, alors, ne serait plus une barrière). Cela exigera probablement un traitement quantique de la gravitation. Deux exemples illustrent l'évocation des phénomènes quantiques en cosmologie : l'accélération de l'univers et l'inflation.

3. Constante cosmologique, énergie sombre

Paramètres cosmologiques

Les caractéristiques des modèles de big-bang se divisent en deux aspects[12] :

- **L'aspect spatial** : il n'existe que trois types d'espace homogène, qui se distinguent par le signe k de leur courbure : espace sphérique (k =1), espace « plat » (k=0), espace hyperbolique (k=-1).

- **L'aspect temporel** : il se manifeste par la loi d'expansion $x(t)$, qui exprime la manière dont une longueur cosmique arbitraire (le *facteur d'échelle*) varie avec le temps t. Cette fonction (définie à une constante près ; on suppose x=1 aujourd'hui) s'annule pour une valeur $t=t_i$, dans le passé, ce qui constitue la définition d'un modèle de big-bang. La différence entre t_0 (aujourd'hui) et t_i définit *l'âge de l'univers*. Il n'existe évidemment aucune valeur du temps inférieure à t_i.

L'histoire de l'univers se raconte en remontant le temps depuis t_0 vers t_i : longueurs et volumes tendent vers zéro (expansion). Densités, pressions et températures augmentent (dilution, refroidissement, au moins pour la matière « ordinaire »). Les conditions physiques, de plus en plus denses et chaudes, se différencient de plus en plus de celles de nos laboratoires.

[12] Dans le cadre de la relativité générale, ces deux aspects (géométrie de l'espace, et évolution de cette géométrie) apparaissent comme purement géométriques, dans la géométrie *quadridimensionnelle* de l'espace-temps. L'expansion manifeste la partie de la courbure de l'espace-temps qui concerne la dimension temporelle.

Un modèle de big-bang est caractérisé complètement par le signe k, et la loi d'expansion $x(t)$[13]. Les observations nous fournissent la valeur de la constante de Hubble H_0, qui s'identifie à la pente (la dérivée) de la fonction $x(t)$ aujourd'hui (*taux d'expansion*). Mais les cosmologues voudraient en savoir davantage. L'*accélération* de l'expansion, dérivée *seconde* de la fonction $x(t)$, constitue le premier indicateur de la dynamique cosmique. Elle est notée par un paramètre q_0 : négatif si l'expansion s'accélère, et réciproquement (ce choix provient du fait que la matière ordinaire entraîne décélération).

Tests cosmologiques

Les observations, d'un type ou d'un autre (âge de l'univers, fond diffus cosmologique, tests cosmologiques, autres arguments tels que la présence de masse cachée ; voir *Initiation à la Cosmologie*), ne nous fournissent malheureusement pas directement la valeur de q_0 ; mais des combinaisons de cette quantité, avec d'autres qui impliquent le rayon de courbure spatial.

L'ensemble de ces observations suggère que la courbure de la partie *spatiale* de l'univers est proche de zéro. Elles semblent favoriser une valeur légèrement positive, mais la précision est tout à fait insuffisante pour trancher, ce qui laisse subsister les trois possibilités k=-1, 0 ,+1. L'invocation d'un « univers plat » est donc, au mieux, extrêmement prématurée. Une précision infinie (impossible à obtenir) serait d'ailleurs nécessaire pour montrer *rigoureusement* que l'univers est plat : expériences ou observations peuvent seulement indiquer que la courbure spatiale est inférieure à telle ou telle limite. Par ailleurs, pour éviter toute équivoque, rappelons que les termes « d'univers plat », tels qu'ils sont souvent employés, évoquent un univers dont la partie *spatiale* est sans courbure. Il n'est évidemment pas question d'une courbure nulle de *l'espace-temps*.

Les mêmes observations – convergence d'un ensemble assez large de résultats - suggèrent aussi que l'expansion cosmique est aujourd'hui accélérée. Or, il en résulte une conséquence immédiate : si vraiment l'expansion s'accélère, la dynamique de l'univers ne peut être expliquée par la matière ou le rayonnement ordinaires *seulement*. À moins d'adopter une physique foncièrement différente, cela laisse deux possibilités : ou bien une *constante cosmologique* intervient dans les équations d'**Einstein** ; ou bien il existe dans l'univers une certaine forme *d'énergie sombre*. Une grande confusion règne à ce propos.

Qui accélère l'expansion ?

Constante cosmologique _ et *énergie sombre* (par exemple *énergie du vide*) sont des choses très différentes. La première est une « constante universelle » (comme la constante de gravitation G) prévue (ou en tous cas possible) dans le cadre de la théorie de la relativité générale. Vu la nature « géométrique » de cette dernière, on peut déclarer que _ est de nature géométrique elle aussi, de la même manière que tout ce qui concerne la gravitation. Il est ainsi naturel de l'exprimer par une longueur. Pas plus que pour G ou toute autre constante fondamentale, la théorie ne prévoit de valeur particulière. Par définition, la constante cosmologique reste *rigoureusement constante* dans le temps et l'espace, ce qui détermine complètement son influence sur l'univers.

[13] Il faut spécifier en plus la valeur présente du rayon de courbure de l'espace.

Énergie du vide

Le pan de la physique qui ne relève pas de la gravitation est aujourd'hui décrit par la théorie quantique des champs : toute *substance* est décrite comme un *champ quantique*, dans un certain *état*. Certains de ces états présentent des caractéristiques particulières : une substance dans un cet état peut être décrite en termes de particules. C'est une approximation (en physique quantique, les particules n'existent pas), mais elle décrit très bien une partie de la réalité (en particulier la plupart des systèmes qui nous environnent).
En revanche, la même substance peut très bien se trouver dans un état impossible à décrire en termes de particules, même approximativement ; c'est par exemple le cas de *l'état fondamental*, appelé familièrement « le vide ». Pourtant, du point de vue quantique, cet état est comme les autres (c'est même le plus simple).
Un problème cependant : le calcul de son énergie donne une valeur infinie (et même une infinie en chaque point). D'un certain point de vue, cela anéantit la cohérence de la théorie : la théorie quantique des champs ne peut être une théorie fondamentale (comme l'est peut-être la relativité générale), et on la considère comme une théorie *effective* : en caricaturant, une liste de recettes pratiques exprimant des lois fondamentales que nous n'avons pas encore découvertes.
Toujours est-il qu'une opération baptisée *renormalisation* permet de restaurer une certaine cohérence, en ramenant ces valeurs infinies à des valeurs finies. On peut de cette manière obtenir n'importe quelle valeur pour l'énergie du vide, ce qui laisse à penser que le concept n'a guère de sens. Cependant, la procédure donne au moins un sens à la *différence* entre les énergies de deux états fondamentaux.
Cependant, le concept d'une *différence d'énergie* (responsable par exemple de l'effet Casimir) est bien différent de celui d'une *énergie* susceptible d'exercer un effet gravitationnel, dont aucune expérience ou observation ne suggère l'existence. L'idée ne pourra en être acceptée (ou rejetée) que lorsque nous disposerons d'une théorie synthétisant théorie quantique des champs et gravitation. Nous en sommes encore loin.

En revanche, une éventuelle *énergie sombre* n'est pas une constante de la physique. C'est une forme de substance de nature quantique, par exemple une énergie du vide, un « inflaton », une « quintessence »,... Bien qu'on ne puisse en rendre compte en termes de particules ou de rayonnement ordinaire, elle est de nature matérielle plus que géométrique : un certain champ quantique dans un certain état, qui se répartit dans l'espace-temps courbe.

L'influence gravitationnelle d'une telle substance pourrait être très différente de celle la matière ou des rayonnements ordinaires. Par exemple, plutôt que d'exercer une *attraction*, et de ralentir l'expansion cosmique (comme nous en avons l'habitude), elle pourrait l'*accélérer* ; ne pas se diluer mais rester toujours présente malgré l'expansion.

Une telle influence sur la dynamique cosmique peut ressembler, dans certaines circonstances, à celle d'une constante cosmologique. Ce pourrait être le cas, en particulier, dans la phase présente de l'univers : c'est pourquoi les observations ne permettent pas de trancher aujourd'hui entre constante cosmologique ou énergie sombre.

Pourtant, un champ quantique possède une dynamique : une énergie du vide (ou toute forme d'énergie sombre) varie dans le temps, voire même dans l'espace. Ainsi, énergie sombre et constante cosmologique ont des influences fort différentes sur la dynamique cosmique dans sa globalité.

La constante cosmologique : des problèmes ?

Les observations actuelles ne permettent pas de trancher entre les deux possibilités, à cause de a ressemblance des effets sur la dynamique cosmique d'*aujourd'hui*. L'évocation d'une constante cosmologique semble naturelle : bien que toujours controversée, elle date des tous premiers modèles cosmologiques (1917), bien avant les résultats récents ; elle n'a donc rien d'une explication *ad hoc*. Prévue par la relativité générale, elle ne fait appel à aucune physique nouvelle.

Une énergie sombre, en revanche, suppose des effets physique d'un genre nouveau, comme une influence gravitationnelle de l'énergie du vide, dont l'idée même est loi d'être validée par la théorie ou par l'expérience.

Si de nombreux physiciens sont prêts à « parier » sur un rôle gravitationnel effectif de l'énergie du vide, l'hypothèse soulève néanmoins une difficulté : malgré l'absence de théorie précise, des raisonnements « dimensionnels » suggèrent, pour une telle contribution, un ordre de grandeur absolument énorme, dépassant plus de 10^{100} fois les limites permises par la cosmologie. Fait tout à fait étonnant, cela est souvent évoqué comme un « problème de la constante cosmologique ». Le lecteur aura compris qu'il est au contraire issu de l'hypothèse contraire : qu'une énergie sombre – et non pas une constante cosmologique – soit responsable de la dynamique cosmique.

Cette mauvaise terminologie recouvre une réelle difficulté ; tant que la physique quantique n'inclut pas la gravitation (ou que nous disposons pas d'une théorie plus globale), l'énergie du vide n'est qu'un mot ... vide, auquel on ne peut prêter de caractère explicatif. Que l'on penche vers l'une ou l'autre option, une autre question se pose. Matière, rayonnement, énergie du vide, etc. obéissent à des lois de dilution différentes (du point de vue de la cosmologie, c'est ce qui les distingue essentiellement). Au cours de l'évolution cosmique, leurs contributions respectives varient. Aujourd'hui, celle de la constante cosmologique (ou d'une énergie sombre) est égale celle de la matière à un facteur 2 près (Ω_Λ voisin de 2 Ω_m). Doit-on ou non y voir une coïncidence ? Est-il *remarquable* que ce soit précisément aujourd'hui dans l'histoire cosmique (au moment où nous sommes ici pour observer) que ces deux valeurs sont du même ordre ? Est-ce un pur hasard, comme il y en a tant dans la nature, ou doit-on y trouver une explication ? Cela est parfois évoqué sous les termes de « second problème de la constante cosmologique ».

4. Inflation et homogénéité

Un « problème d'homogénéité » ?

Le big-bang ne prétend pas être une théorie complète. Il ne peut décrire la totalité de l'évolution cosmique, puisque notre physique ne s'applique pas aux états très anciens de l'univers. Relativité générale, physique quantique, toutes les théories actuelles perdent leur validité dans les conditions physiques extrêmes voisines de l'échelle de Planck : l'incomplétude du big-bang reflète celle de nos connaissances physiques.

Pouvons nous *prolonger* le big-bang (vers le passé) ? Déterminer ce qui s'est passé dans les premiers instants ? Il faudrait pour cela de nouvelles théories. Nous en sommes aux conjectures.

La pure *logique* implique qu'un modèle ne peut expliquer lui-même la raison de sa validité. Cela semble trop souvent oublié à propos des modèles de big-bang : comprendre leur origine, et leur succès, cela exige un cadre plus général. Les modèles de big-bang se fondent sur l'hypothèse d'un univers homogène et isotrope (en moyenne). Les observations ne peuvent *prouver* cette homogénéité, tout simplement parce qu'il est impossible d'examiner toutes les régions du cosmos pour les comparer. On la *suppose* donc (Principe cosmologique) pour construire les modèles de big-bang. Par la suite, toute validation du modèle augmentera notre confiance dans l'hypothèse de départ.

Les modèles de big-bang *prédisent* donc que les observations doivent révéler l'homogénéité de l'univers ; en particulier, que le fond diffus cosmologique doit être isotrope : toute observation d'une anisotropie (suffisamment importante) irait à leur encontre. Certains énoncent pourtant un « problème de l'homogénéité », aussi appelé « problème de l'horizon ». Nous allons voir que ce n'est pas un problème du big-bang, bien au contraire. J'en rappelle l'expression condensée :

Les observations du fond diffus cosmologique indiquent que l'univers était extrêmement homogène à l'époque de la *recombinaison* (d'où provient le rayonnement), il y a quinze milliards d'années environ.
Dans l'univers très jeune à cette époque (moins d'un million d'années), aucun processus n'a eu le temps de se propager dans une grande région de l'univers. Il ne peut donc être responsable de l'homogénéité à l'époque de la recombinaison.

Cette apparente contradiction fait-elle problème ?

Je rappellerai d'abord que l'idée même de recombinaison, et de fond diffus cosmologique, n'a de sens que dans le cadre du big-bang, c'est-à-dire si l'univers est déjà homogène à cette période et même bien avant. C'est donc une *absence* d'homogénéité qui aurait constitué un grave problème.

L'univers doit être, par définition, homogène *dès les premiers instants* où il est décrit en termes de big-bang : tout processus décrit dans le cadre du big-bang se déroule – y compris son début - dans un univers *déjà homogène*. Au contraire, si l'on attribue l'homogénéité de l'univers à un certain processus X (par exemple l'inflation), ce processus a dû démarrer dans un univers *non homogène*, puisqu'on lui prête la vertu de le *rendre* homogène. En vertu de ce qui est écrit plus haut, un processus homogénéisateur ne peut être *décrit* dans le cadre d'un modèle de big-bang.

Inflation

L'inflation serait une phase très courte (une infime fraction de seconde) du déroulement de l'univers, qui se serait déroulée dans ses tous premiers instants (une fraction de seconde après l'ère de Planck). Il n'existe pas un modèle précis d'inflation, mais des idées générales, conjuguées diversement.

La caractéristique fondamentale est que, durant cette période, la dynamique de l'univers aurait été commandée par une composante d'*énergie sombre*, qui aurait assuré une expansion démesurément rapide : pendant la courte durée de l'inflation, toutes les dimensions de l'univers auraient été amplifiées d'un facteur F qui, selon les versions, varie entre 10^{50} et 10^{100}.

L'énergie sombre invoquée pourrait être par exemple l'énergie du niveau fondamental (vide) d'un certain champ quantique baptisé *inflaton*. Ce champ n'a jamais été observé. Il n'est prédit de manière précise par aucune théorie actuelle. Mais il le sera peut-être par une théorie future. Pour le moment, son existence et ses propriétés sont imaginées de manière *ad hoc*, et décrites dans un cadre *semi-classique*.

Si toutes les longueurs sont amplifiées du facteur F, c'est aussi le cas du rayon de courbure spatial de l'univers : la courbure de l'espace se trouve diminuée, après l'inflation, du facteur F^2 : l'espace est alors vraisemblablement devenu « presque » plat. Les extensions spatiales des microscopiques fluctuations quantiques du vide sont elles aussi amplifiées du facteur F. Elles sont ainsi amenées à des dimensions astronomiques.

L'inflation est souvent invoquée comme « solution du problème de l'homogénéité ». Cela impliquerait évidemment de décrire son déroulement *hors du cadre des modèles de big-bang*, dans un univers au départ inhomogène. Il est malheureusement difficile de décrire un univers non homogène, et un processus (tel que l'inflation) qui s'y serait déroulé. Dans les quelques cas où cela a été fait, le résultat n'est guère encourageant : si l'univers d'avant

l'inflation est trop loin de l'homogénéité, l'inflation est impossible ; dans d'autre cas, elle accentue l'écart à l'homogénéité : l'inflation ne peut expliquer l'homogénéité cosmique. Sa seul vertu consiste à agrandir, du facteur F, les échelles d'homogénéité (ou d'hétérogénéité)

Imaginons d'ailleurs que ce soit le cas : on n'aurait plus à expliquer pourquoi l'univers était au départ homogène. Mais le problème n'aurait fait que changer de formulation : il serait tout aussi « important » d'expliquer pourquoi l'univers était dans son état de départ (non homogène), celui qui permet l'inflation.

La seule manière de faire progresser notre compréhension serait de découvrir un processus *générique* : suffisamment efficace pour avoir rendu l'univers homogène, *quel qu'ait été son état initial*, non homogène : l'homogénéité se comprendrait alors comme une conséquence des lois physiques assurant le déroulement du processus X. Ni l'inflation, ni aucun processus, ne joue aujourd'hui un tel rôle. Les cosmologues optimistes espèrent qu'une nouvelle théorie, telle la cosmologie quantique, fera apparaître un tel processus générique, inflation ou autre.

L'inflation, tout de même ?

Que l'inflation n'explique pas l'homogénéité de l'univers[14], cela n'implique pas que l'univers ne soit pas passé par une telle phase. L'hypothèse nécessite l'ajustement *ad hoc* d'un nombre élevé de paramètres (on pense à la théorie des épicycles) : du point de vue cosmologique, guère de changement par rapport à la situation sans inflation. Mais il faut supposer l'existence d'une composante d'énergie sombre (*inflaton*) à l'origine du processus, munie d'une panoplie de propriétés convenables. Le prix paraît cher payé, mais un résultat pourrait cependant justifier ces efforts : c'est peut-être de l'inflation que résulte l'apparition des semences à partir desquelles, quelques milliards d'années plus tard, germeront les galaxies : l'inflation transforme en effet les *fluctuations quantiques*, toujours présentes, en leur fournissant les caractéristiques adéquates.

De très nombreuses études sont consacrées (dans un cadre très approximatif) aux effets que pourrait engendrer l'inflation. Il reste à espérer que les progrès de la physique valideront de manière naturelle l'idée d'énergie sombre - par exemple les effets gravitationnels de l'énergie du vide – et, par là même, les caractéristiques de l'inflation.

Que l'inflation se soit ou non déroulée n'a finalement guère d'importance pour les modèles de big-bang. Il semble plus enthousiasmant de se pencher sur ce que pourrait apporter une nouvelle physique (L'inflation y apparaîtra-t-elle ou non ?).

5. Perspectives

Le problème essentiel de la physique théorique provient de sa schizophrénie : une moitié décrit la matière en termes de *champs quantiques*, dans un espace-temps figé et sans courbure. L'autre moitié décrit un espace-temps géométrique courbe, déformé sous l'influence de la matière.

[14] J'ai montré ailleurs (voir *Le fond diffus cosmologique*) que le « problème de la platitude » ne constitue pas non plus un argument solide en faveur de l'inflation.

Les physiciens adoptent souvent une vision *semi classique* comme compromis provisoire : une adaptation de la description quantique de la matière (originellement dans un espace-temps sans courbure et sans expansion), à la cosmologie relativiste. C'est dans un tel cadre que l'on évoque aujourd'hui les possibilités d'énergie sombre, d'inflation, etc.

Mais cette étape provisoire ne satisfait pas de nombreux théoriciens, qui préfèrent se consacrer à la recherche d'une physique plus profonde (voir *La quête de l'unité*). Cela permettrait de traiter non seulement ce qui relève aujourd'hui de l'approche semi-classique mais aussi – c'est en tout cas l'espoir qui sous-tend ces travaux - de se rapprocher de l'ère de Planck.

De nombreuses approches cherchent par exemple à construire une *gravité quantique*. Dans un tel cadre, la géométrie de l'espace-temps serait elle-même quantifiée et devrait donc, comme toute grandeur quantique, « fluctuer ». Cela interdirait de parler d'un espace-temps géométrique dans le sens où nous l'entendons aujourd'hui. La géométrie au sens usuel ne réapparaîtrait que dans des conditions suffisamment simples, celles où la gravité quantique se réduirait à la gravité ordinaire ; tout comme la physique quantique se réduit à une description en termes de particules dans la physique simple de notre environnement. Difficulté principale : pas de temps, pas de causalité pour décrire l'évolution des phénomènes.

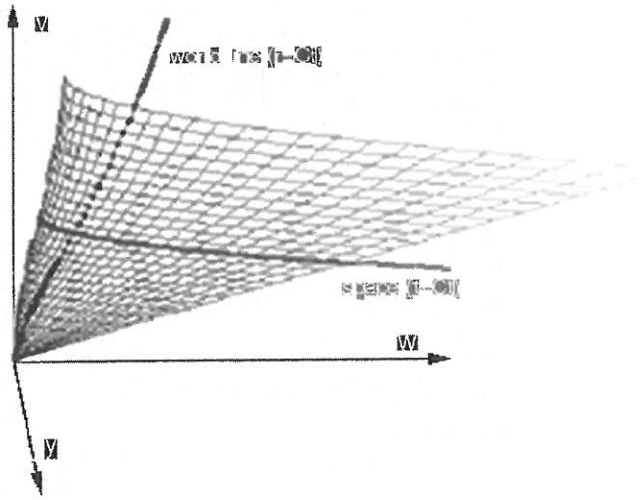
Deux approches essentielles se développent actuellement, au moins sur un plan formel : d'un côté la théorie des *cordes* et *supercordes*, qui a évolué récemment en théorie des *branes* (et qui devait évoluer vers une « théorie M » que les théoriciens cherchent à mettre sur pieds). De l'autre, des approches plus formelles qui cherchent véritablement à construire une physique sans espace-temps : gravité *en boucles*, *réseaux de spin*, ...

Dans des conditions physiques suffisamment simples (celles que nous expérimentons aujourd'hui), le caractère quantique de la géométrie serait gommé et l'espace-temps devrait réapparaître. Néanmoins, l'aspect quantique de la géométrie pourrait subsister aux échelles très microscopiques, voisines de celle de **Planck** (bien moins que les dimensions des particules élémentaires) : un *principe d'incertitude géométrique* pourrait par exemple interdire toute localisation absolue. Les mathématiques récentes offrent déjà un outil pour traiter un tel aspect, selon une généralisation de la géométrie ordinaire appelée *géométrie non commutative*. Cette géométrie nouvelle, développée pour elle même, apparaît aussi naturellement dans le cadre de la supersymétrie et des supercordes. Elle constitue sans doute une des bases de la physique théorique du prochain siècle.

La gravité quantique apparaît comme une théorie compliquée. Faute de quantifier tous les aspects de l'espace-temps, les cosmologues pourraient se satisfaire d'une version simplifiée, développée sous l'appellation de *cosmologie quantique* : devant l'impossibilité d'envisager toutes les fluctuations possibles de l'espace-temps (leur ensemble constitue ce que l'on appelle le *super espace*), ils se restreignent à un ensemble plus limité (*mini super espace*), qui ne comprend que les géométries les plus simples : par exemple uniquement celles qui correspondent aux modèles de big-bang. Il devient ainsi possible de « quantifier » certains aspects de la cosmologie. Mais ceci reste encore très formel, car on ne sait pas vraiment interpréter la « fonction d'onde de l'univers », ou les « probabilités de transition » d'un état cosmique à un autre. Les travaux effectués dans ce cadre (par exemple ceux de **Hawking**, **Linde**, ...) ont au moins le mérite de proposer des notions nouvelles : effet tunnel pour l'univers dans son ensemble, absence de conditions limite, ...

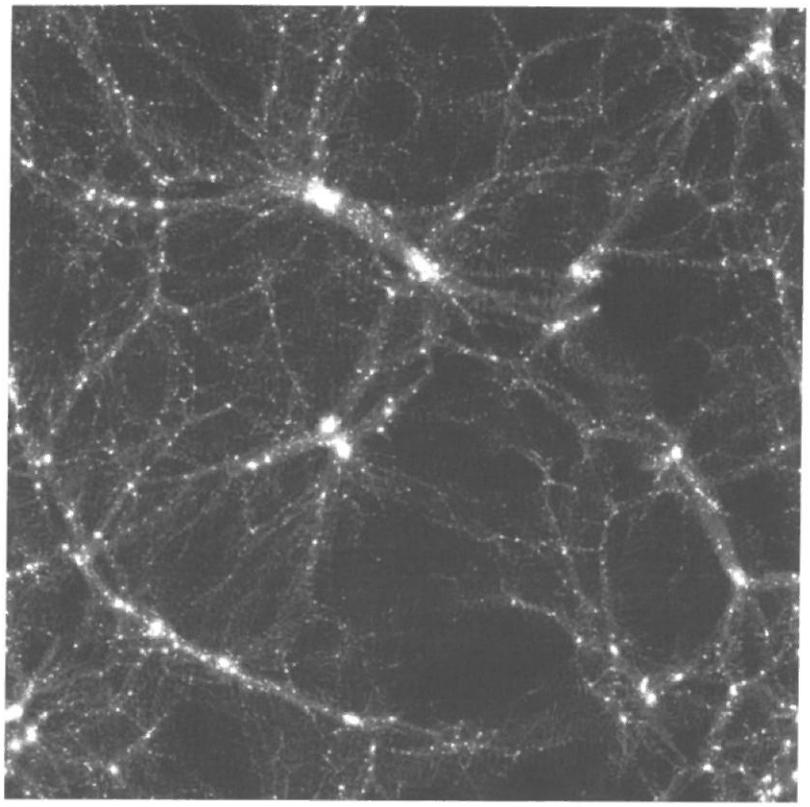
Ces théories, si elles sont un jour au point, permettront peut-être de comprendre les premiers instants de l'évolution cosmique. Non pas l'origine ou la création du monde, mais une phase très primordiale de « pré big-bang », dont l'évolution aurait abouti à la

phase décrite par le big-bang : peut-être pourrait on y trouver une explication à l'expansion, ou à l'homogénéité de l'univers.



Voir la forme de l'espace-temps : L'espace-temps (variété à 4 dimensions) favori des cosmologues (W=1/3, L=2/3) est "plongé" dans une variété à 5 dimensions, ce qui permet de visualiser sa forme (tiré de *The Friedmann - Lemaître models in perspective : Embeddings of the Friedmann-Lemaître models in a 5-dimensional space*, M. Lachièze-Rey, astro-ph/0010163)

Georges Lemaître, inventeur du *big bang*
(voir http://wwwastr.ucl.ac.be/images/Lemaître.jpg)



Une simulation de l'Univers. Les astrophysiciens simulent sur de gros calculateurs le processus de formation des galaxies dans le cadre des modèles de big bang (Romain Teyssier, Sap, CE Saclay)

❑Bibliographie

• *Univers*, J. Demaret, Le Mail 1991
• *À la poursuite du Big-bang*, J. Gribbin, Éditions du Rocher, 1991
• *La nature de l'espace et du temps*, S. Hawking et R. Penrose, Gallimard 1997
• *La quête de l'unité*, E. Klein et Marc Lachièze-Rey, Albin Michel 1996
• *Le fond diffus cosmologique*, Marc Lachièze-Rey et Edgar Gunzig, Masson 1995
• *Initiation à la cosmologie*, M. Lachièze-Rey, Dunod 2000 (3ème édition)
• *Alexandre Friedmann et Georges Lemaître, Essais de cosmologie, l'invention du big-bang*, Jean - Pierre Luminet, Seuil - Sources 1997
• *La physique et l'infini*, J.-P. Luminet et M. Lachièze-Rey, Flammarion 1994
• *L'univers relativiste*, S. Mavridès, Masson 1979
• *Chronique de l'espace-temps*, A. Mazure, G. Mathez et Y. Mellier, Masson 1994
• *Cosmologies du XXème siècle. Etude Epistémologique et historique des théories de la Cosmologie contemporaine*, J. Merleau-Ponty, Gallimard, Paris, 1965
• *Structure formation in the universe*, T. Padmanabhan, Cambridge University Press 1993
• *Physical cosmology*, J. Peebles, Princeton University Press, 1971
• *Theoretical and observational Cosmology*, Kluwer (NATO Science Series) 2000
• *Le big-bang en questions*, Science et Vie Hors série n° 189, décembre 1994

❒L'auteur

Marc Lachièze-Rey : Astrophysicien, Directeur de recherches au CNRS, France

Publications

Connaissance du Cosmos, Albin Michel 1987

Initiation à la cosmologie, Dunod 2000 (3ème édition)
[traduction: Cosmology: a First Course, Cambridge University Press 1995]

La quête de l'unité (avec E. Klein), Albin Michel, 1996
[The quest for unity, the adventure of physics, Oxford University Press, 1999]
Die Entwirrung des Universums, Klett-Cotta, 1999
A Aventura da Fisica : A demande da Unidade, Instituto Piaget, Lisboa, 2000]

Figures du ciel, avec J.-P. Luminet, Seuil-éditions BnF, 1998 (trad. Celestial treasury, Cambridge University Press, 2001)

L'infini, de la philosophie à l'astrophysique,
Marc Lachièze-Rey, Optiques Hatier 1999

Au-delà de l'espace et du temps : la nouvelle physique,
Marc Lachièze-Rey, éditions Le Pommier, Paris, Éditions Le Pommier 2003.

Deux CD's inédits :

Les galaxies (durée 1h), Éditions De Vive Voix 2001 (diffusion Les Belles Lettres)

La cosmologie (durée 1h), Éditions De Vive Voix 2002 (diffusion Les Belles Lettres)