

Jean-Marc Bonnet-Bidaud  
Thomas Lepeltier

# Big bang

Histoire critique d'une idée

INÉDIT  
essais  
folio





COLLECTION  
FOLIO ESSAIS



Jean-Marc Bonnet-Bidaud  
Thomas Lepeltier

# Big bang

Histoire critique d'une idée

Gallimard

© Éditions Gallimard, 2021.

*Couverture : Illustration © Julien Langendorff.*

Jean-Marc Bonnet-Bidaud est astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). Il a publié de nombreux articles sur l'histoire de l'Univers et les grands problèmes de la cosmologie moderne, ainsi que des travaux sur les conceptions astronomiques anciennes en Chine et en Afrique.

Docteur en astrophysique, Thomas Lepeltier est chercheur indépendant en histoire et philosophie des sciences ainsi qu'en éthique animale, membre associé du Oxford Centre for Animal Ethics (Royaume-Uni). Sur ces deux thématiques, il a publié une dizaine d'ouvrages.



## *Avertissement des auteurs*

Ce livre propose une histoire critique du modèle du big bang, qui correspond à notre description actuelle de l'évolution de l'univers. Depuis les années 1970, ce modèle cosmologique est largement accepté par la communauté scientifique. Ce succès, jamais démenti depuis lors, pourrait être vu comme un signe de sa robustesse. La plupart des cosmologistes ne considèrent-ils pas, sans le moindre doute, qu'il décrit l'histoire de l'univers, du moins dans ses grandes lignes ? En particulier, ils sont convaincus que l'univers émerge il y a 13,8 milliards d'années. Ce livre aurait donc pu raconter comment ce modèle s'est, depuis plus de quarante ans, affiné et amélioré afin de rendre compte, avec une précision croissante, des observations du ciel. D'une certaine manière, il aurait alors été un peu similaire à ces anciens ouvrages d'histoire qui, après la conquête de nouveaux territoires, racontent comment les explorateurs en ont établi la cartographie précise.

Notre approche est différente. Nous avons cherché à raconter tant les progrès accomplis en

cosmologie que les difficultés rencontrées par ce modèle du big bang et à comprendre comment les cosmologistes ont cherché à s'accommoder de ces problèmes. C'est donc une histoire où il est question de découvertes fondamentales mais aussi de prédictions jamais réalisées, de calculs qui clochent et d'observations embarrassantes. Surtout, nous avons choisi de montrer combien l'unanimité de façade des cosmologistes cachait en réalité une montagne de difficultés qui sont la plupart du temps éludées dans la présentation de la cosmologie moderne. Certes, il existe bien des travaux qui soulignent les faiblesses du modèle d'univers actuellement dominant, mais ils sont souvent minimisés et rarement mentionnés dans les publications grand public. Aussi, avec ce livre, le lecteur pourra-t-il pénétrer dans les coulisses de l'activité scientifique et se faire une opinion plus concrète des qualités et des défauts de l'histoire de l'univers telle qu'elle est présentée de nos jours. À l'opposé d'une conquête accomplie sur un territoire bien défini, nous préférons ainsi l'image d'une avancée dans un territoire qui se dérobe au fur et à mesure que des conquistadors y pénètrent. Tout en faisant des découvertes, les voici donc allant de surprise en surprise et obligés de refaire en permanence la carte du territoire qu'ils ont l'impression d'avoir conquis. La question ouverte est bien sûr de savoir s'ils ne sont pas en train de s'illusionner sur l'étendue et la topographie réelle de leur nouveau terrain d'investigation.

Pour qu'il n'y ait pas de malentendu, nous tenons à préciser que nous ne nous opposons pas

au modèle du big bang. Nous n'en sommes pas des adversaires et n'avons rien d'autre à proposer. Ce modèle est sans aucun doute une étape importante de notre compréhension de l'univers. Mais c'est dans une visée pédagogique que nous tentons d'en mettre en lumière les points faibles. En quelque sorte, nous choisissons de présenter le « verre de la cosmologie » à moitié vide plutôt qu'à moitié plein. Si nous voyons en effet des coups de génie dans le travail des cosmologistes, nous y décelons aussi des failles, des faiblesses et des limites, qui reflètent d'ailleurs le véritable cheminement de l'activité scientifique, fait d'avancées et d'erreurs. Sur les difficultés du modèle du big bang, nous n'avons pas d'opinion tranchée, mais seulement une intuition que leur accumulation pourrait bien conduire à des révisions fondamentales. Par notre démarche, nous attendons donc avec hâte les découvertes futures, notamment celles résultant de la mise en service du nouveau télescope spatial James Webb, et nous cherchons à préparer les esprits aux possibles bouleversements conceptuels qui pourraient en découler. Saine approche, osons-nous penser, qui permet d'échapper à la simplification des discours dominants.



## *Prologue*

### UNE CRISE EN DEMI-TEINTE

En un siècle, la cosmologie a fait des progrès étonnants. Cette discipline qui étudie l'univers dans son ensemble se distingue de l'astrophysique qui en étudie seulement ses constituants. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, les astrophysiciens ne peuvent pas encore dire si toute la matière de l'univers est contenue dans notre Galaxie ou si elle s'étend au-delà, sous forme d'autres galaxies. Ils ne savent pas si l'univers a une origine dans le temps ou s'il est éternel. Ils se demandent même si cette question relève de la science ou de la métaphysique. Ils n'ont aucune idée de l'origine des éléments chimiques et n'entrevoient aucune relation entre leur proportion relative et la constitution des cieux. Enfin, avec les moyens d'observation de l'époque, ils sont incapables de distinguer clairement des astres situés à plus de quelques millions d'années-lumière. D'ailleurs, la cosmologie, en tant que discipline de recherche à part entière, n'existe pas encore. Ceux qui s'y adonnent à l'occasion sont quelques rares mathématiciens ou physiciens versés dans les questions spéculatives. De

cosmologistes, professionnels, il n'y a point. On pourrait donc presque dire que, à cette époque, la cosmologie n'existe pas. D'ailleurs, le discours sur l'univers est alors vague et imprécis.

#### LES SUCCÈS DE LA COSMOLOGIE

Puis, petit à petit, les cieus se sont éclaircis. Dans les années 1920, les astronomes comprennent que notre Galaxie n'en est qu'une parmi une multitude d'autres. Au début des années 1930, ils se persuadent que l'univers est en expansion, c'est-à-dire que les distances entre les galaxies augmentent. Dans les années 1950, ils établissent que la quasi-totalité des éléments chimiques se sont formés dans les étoiles. Puis, au cours des années 1960, ils se convainquent que les plus légers de ces éléments n'ont pu s'assembler que lors d'une période initiale où l'univers était très chaud et très dense. Ce résultat fait perdre beaucoup de crédit à l'idée, encore présente à l'époque, d'un univers éternel. À la place, c'est l'idée que notre univers est né d'un big bang qui s'impose à presque toute la communauté scientifique. Dans les années 1970, elle devient presque une vérité établie. Le terme « big bang » désigne alors cette phase chaude et dense initiale d'où est issue l'expansion de l'univers qui s'ensuit. Par abus de langage ou simplification, le terme peut aussi recouvrir la notion de « naissance » de l'univers. Enfin, le même terme est également employé pour

décrire l'ensemble de l'évolution de l'univers qui découle de la phase initiale chaude. On parle ainsi de l'univers du big bang.

La durée écoulée depuis ce big bang, très souvent considéré comme la naissance de l'univers, n'est pas estimée avec précision. Les astronomes la situent alors entre 10 et 20 milliards d'années. Au moins, tout le monde, ou presque, est d'accord sur le fait que notre univers est né d'une phase très chaude et très dense datant d'il y a quelques milliards d'années. Cette imprécision va, de toute façon, s'atténuer au cours des décennies suivantes. Dans les années 1990, l'âge de l'univers est fixé à environ 15 milliards d'années. Au début des années 2000, il est établi avec une précision accrue à 13,8 milliards d'années.

La cosmologie semble entrée dans l'ère de l'exactitude, comme l'indique d'ailleurs l'utilisation récurrente de l'expression « cosmologie de précision » à partir de cette époque. Fini donc le temps où elle était assimilée à de la métaphysique. Plus question non plus de s'interroger sur sa scientificité. Il y a désormais, au sein des facultés ou universités de sciences, des départements de cosmologie. Elle est manifestement devenue une discipline scientifique comme les autres. Quant aux cosmologistes, ils peuvent raconter avec assurance l'histoire passée de l'univers presque dans ses moindres détails et même laisser entrevoir son futur.

## LES OMBRES DE LA COSMOLOGIE

Pourtant, dans ce récit épique des progrès fulgurants de la cosmologie, il y a des ombres au tableau. D'abord, l'univers est-il vraiment en expansion ? C'est très probable, du moins pour ce qui concerne l'univers observable. Il n'en reste pas moins que l'expansion de l'univers visible n'est qu'une interprétation de certaines données d'observations. Elle est très convaincante, mais elle a quand même été contestée par d'éminents chercheurs. Il paraît sage de ne pas oublier ces velléités sceptiques. Plus fondamentalement, le modèle du big bang explique-t-il la constitution matérielle des cieux ? Il était bien parti pour réaliser cet exploit. Mais pour rester cohérent, dès les années 1970, il a fallu postuler l'existence d'une matière d'une nature autre que la matière ordinaire, appelée « matière noire », jamais observée directement. Ce n'est pas un ajout secondaire que l'on peut facilement négliger. En masse, il y aurait cinq fois plus de cette énigmatique matière que de matière normale, celle qui constitue les fleurs, les pierres, les étoiles ! Or, près de cinquante ans après avoir été postulée, elle reste introuvable.

Ensuite, l'idée que l'univers est né d'un big bang s'est avérée un peu trop simple. Dès les années 1980, pour expliquer les propriétés globales de l'univers observable, les cosmologistes se sont sentis obligés d'introduire une théorie, dite de l'inflation, qui décrit une phase très

courte d'expansion faramineuse au tout début de l'univers. Le problème est que cette théorie de l'inflation repose sur la présence d'un champ physique (comme l'est un champ électromagnétique) dont on n'a jamais pu jusqu'ici garantir l'existence. Puis, c'est l'idée même d'expansion qui a dû aussi être revue de fond en comble. Dès le début du modèle du big bang et jusqu'à la fin des années 1990, tous les partisans de ce modèle étaient convaincus qu'elle devait ralentir avec le temps : plus l'univers était vieux, moins l'expansion était rapide. Pourtant, en 1998, la mesure de l'expansion grâce à de très lumineuses explosions d'étoiles, les supernovae, visibles jusqu'à de très grandes distances, suggéra qu'il n'en était rien : l'expansion accélérerait au lieu de ralentir ! Quelle pouvait être l'énergie à même de relancer ainsi la machine cosmique ? Le mystère était entier et il le demeure aujourd'hui. Pour le résoudre, l'existence d'une « énergie noire » hypothétique, capable d'accélérer cette expansion, a dû être postulée. Matière noire et énergie noire ne sont pas les seuls écueils que rencontre le modèle du big bang ; mais ils sont probablement les plus importants. Toute la question est de savoir s'ils sont les symptômes d'une crise grave de la cosmologie.

#### LA QUESTION DE LA CRISE

Il y a une crise en science quand un conflit entre un corpus théorique et des données

observationnelles ne peut être supprimé qu'en modifiant de façon importante ce corpus. Mais déterminer l'existence d'une crise n'est jamais aisé. Toutes les anomalies ne conduisent pas à des crises. Certaines disparaissent grâce à des observations plus précises ; d'autres sont éliminées grâce à de petits ajustements théoriques qui n'entraînent aucun changement important dans la conception du phénomène observé. Dans ces situations, l'anomalie n'est donc le symptôme d'aucune crise. On peut ainsi toujours avoir l'espoir que les anomalies seront résolues dans l'avenir sans changement de cadre théorique. Aussi est-il difficile de savoir si les difficultés rencontrées par une théorie sont annonciatrices d'un bouleversement conceptuel, d'autant plus que, dans un premier temps, face à des anomalies, des chercheurs peuvent manifester un attachement à la théorie bousculée, avant qu'une autre ne s'avère plus pertinente.

Ainsi, ce n'est souvent qu'après l'apparition du nouveau corpus théorique que l'on comprend qu'une anomalie relevait d'une crise. Par exemple, au XIX<sup>e</sup> siècle, en s'appuyant sur la théorie de la gravitation de Newton, l'astronome Urbain Le Verrier calcula le déplacement dans l'espace de l'orbite de la planète Mercure, en particulier la précession du périhélie de la planète, c'est-à-dire le déplacement régulier du point de l'orbite de la planète qui est le plus proche du Soleil. Bien qu'ayant pris en compte l'effet de toutes les autres planètes, il trouva un léger écart par rapport aux observations. Or, en 1846, ce même Le Verrier avait découvert des anomalies dans

l'orbite d'Uranus qui l'avaient conduit à prédire l'existence de la planète Neptune qui avait été ainsi découverte. S'inspirant de ce succès qui l'avait rendu célèbre, Le Verrier proposa là encore qu'une planète inconnue, baptisée Vulcain, cette fois-ci proche de l'orbite de Mercure, permettrait d'expliquer cette nouvelle anomalie. Confiants dans la valeur de cette prédiction, les astronomes pointèrent donc leurs télescopes vers le ciel pour découvrir Vulcain. Pendant deux décennies, des astronomes eurent l'impression de l'observer, même si les comptes rendus de ces observations n'étaient pas toujours jugés convaincants. Pour beaucoup à l'époque, l'existence de cette planète ne faisait néanmoins pas de doute.

La situation changea finalement, trente ans plus tard, à partir de juillet 1878, lors d'une éclipse censée être propice à l'observation de Vulcain. L'hypothétique planète ne s'étant pas laissé découvrir, cette fois-ci le doute sur son existence s'installa chez les astronomes. Toutefois, cet échec ne les conduisit pas à remettre en cause la théorie de Newton. Pendant plusieurs décennies encore, ils essayèrent de la sauver, par exemple, en imaginant que le Soleil est aplati aux pôles ou en « triturant » légèrement la formule mathématique de la gravitation universelle, sans changer l'essentiel de la théorie. En vain. Aucune solution ne s'avéra satisfaisante. Il fallut attendre 1915 pour qu'Albert Einstein fasse finalement disparaître l'anomalie de l'orbite de Mercure avec sa nouvelle théorie de la gravitation et, du même coup, fasse définitivement oublier Vulcain. L'anomalie du périhélie

de Mercure n'était finalement jamais apparue comme une crise, juste un problème à résoudre<sup>1</sup>. Pourtant, elle était porteuse d'un grand bouleversement de la physique. Reste à savoir combien de problèmes sont, de nos jours, des symptômes cachés de crises à venir...

Demain, les anomalies du modèle du big bang seront peut-être résolues sans modification importante de ce modèle ou des théories physiques qui le sous-tendent. Rétrospectivement, on comprendra qu'elles n'étaient annonciatrices d'aucune crise. Il se peut aussi que les cosmologistes n'arrivent pas à les résoudre ni dans le cadre de ce modèle, ni dans le cadre d'un autre modèle. Dans ce cas, la cosmologie se retrouverait dans une impasse théorique. Mais il sera toujours possible d'éluder la question de la crise en pariant sur une résolution future des anomalies dans le cadre du modèle du big bang. Pour que les anomalies actuelles soient vraiment perçues comme annonciatrices d'une crise, il faut qu'elles commencent à être résolues dans le cadre d'un autre modèle cosmologique qui finira par remplacer le modèle du big bang. À quoi pourrait ressembler ce nouveau modèle cosmologique ? À ce jour, impossible à dire. Mais rien ne nous interdit de méditer sur la nature de ces anomalies qui, éventuellement, l'annoncent. C'est cette réflexion que nous voulons entreprendre ici, en cette période particulièrement excitante où se trouve aujourd'hui la cosmologie moderne, faite d'espoirs et d'incertitudes. Mais, pour en apprécier l'enjeu, il est nécessaire de revenir sur la mise en place progressive du modèle du big bang.

## *Chapitre premier*

### LA PRÉHISTOIRE DU BIG BANG (1915-1965)

Nous sommes le 28 mars 1949. Fred Hoyle, astrophysicien anglais en poste à l'université de Cambridge (Royaume-Uni), est interrogé au sujet des différents modèles d'univers à la radio britannique, la BBC. Après y avoir décrit un nouveau modèle cosmologique dont il est l'un des artisans, où l'univers n'a pas d'origine dans le temps, Hoyle compare ce modèle d'univers éternel avec un autre modèle basé sur « l'hypothèse que toute la matière de l'univers fut créée dans un "big bang" à un moment donné dans un lointain passé<sup>1</sup> ». C'est la première fois que l'expression « big bang » est utilisée pour décrire à cette époque l'hypothèse d'un univers ayant une origine dans le temps. Il n'existe pas d'enregistrement sonore conservé de cette émission, mais une retranscription écrite en a été réalisée<sup>2</sup>. Deux semaines plus tard, ces propos sont d'ailleurs reproduits dans le magazine de la BBC, très lu à l'époque, *The Listener*.

Fred Hoyle y aborde notamment les difficultés qu'affrontaient à l'époque les différentes théories, opposées à son modèle d'univers éternel, qui

cherchaient à trouver une origine à l'expansion de l'univers :

Nous en arrivons à la question de l'application des tests d'observation aux théories antérieures. Ces théories reposaient sur l'hypothèse selon laquelle toute la matière dans l'univers a été créée dans un big bang à un moment particulier dans le passé lointain. Il s'avère que, d'une manière ou d'une autre, toutes ces théories sont en conflit avec les contraintes des observations. Et à un degré difficile à ignorer.

Pour expliquer cette difficulté, Hoyle recourt alors à une métaphore montagnarde :

Les enquêteurs de ce problème ressemblent à un groupe d'alpinistes qui tentent d'escalader un sommet jamais gravi. Auparavant, il avait semblé que la principale difficulté était de décider entre différents itinéraires, chacun offrant des voies d'ascension prometteuses. Mais aujourd'hui, nous constatons que chacune de ces routes conduit à ce qui semble des précipices désespérés. Une nouvelle voie doit être trouvée. La nouvelle voie dont je vais discuter implique l'hypothèse selon laquelle la matière est créée en continu<sup>3</sup>.

Hoyle utilisera à nouveau trois fois le terme « big bang » quelques minutes plus tard en l'opposant à sa propre hypothèse de création continue de matière dans l'univers :

On a soutenu que la création continue introduit une hypothèse supplémentaire dans la discussion

[...]. Mais, je ne suis pas d'accord qu'il s'agit d'une hypothèse supplémentaire. La création continue, dans le sens où je l'ai décrite, est certainement une nouvelle hypothèse. Mais elle remplace une hypothèse qui est totalement cachée dans les théories anciennes, car elles supposent, comme je l'ai déjà dit, que l'ensemble de la matière dans l'univers a été créé dans un big bang à un moment particulier dans le passé lointain.

Après ce rappel historique, Hoyle livre son analyse sur ces deux hypothèses :

Sur le plan scientifique, cette hypothèse de big bang est de loin la moins appétissante des deux. Car c'est un processus irrationnel qui ne peut être décrit en termes scientifiques. La création continue, au contraire, peut être représentée par des équations mathématiques précises dont les conséquences peuvent être comparées à l'observation. Sur le plan philosophique non plus, je ne vois pas de bonnes raisons de préférer l'idée de big bang. En effet, elle me semble être, en termes philosophiques, une notion singulièrement insatisfaisante, puisqu'elle met l'hypothèse de départ hors de portée, là où elle ne pourra jamais être contestée par un recours direct à l'observation.

Ce sont là *in extenso* les premières citations de ce terme scientifique de « big bang » qui deviendra un peu plus tard une des notions les plus populaires de la science moderne.

Au début de l'année 1950, Hoyle donne à nouveau une série d'émissions sur la BBC ayant pour titre « La nature de l'univers » (*The Nature of The*

*Universe*). Ses propos sont reproduits une nouvelle fois dans *The Listener*. Puis, quelques mois plus tard, ils apparaissent sous forme d'un livre, ayant le même titre et qui va connaître un grand succès. Là encore, Hoyle utilise l'expression « big bang » pour décrire les modèles d'univers avec origine dans le temps. Mais l'expression n'aura pas un succès immédiat. Contrairement à ce qui a souvent été dit et répété par la suite, elle n'a, dans la bouche de Fred Hoyle, puis sous sa plume, rien de péjoratif. Hoyle critique certes l'idée d'univers ayant une origine dans le temps, mais l'expression qu'il invente a pour unique finalité de donner aux auditeurs, qui ne sont bien sûr pas des spécialistes du domaine, une image évocatrice de ce genre de modèle. L'intention de Hoyle, en utilisant cette expression, n'est donc pas de ridiculiser ce modèle, même s'il est quand même clair qu'il critique ce dernier, en particulier parce qu'il trouve irrationnel de concevoir un modèle de « création » de l'univers à travers un « big bang » qui ne peut, à ses yeux, être abordé scientifiquement. Si cette expression avait eu une connotation péjorative volontaire, il serait d'ailleurs difficile de comprendre pourquoi Hoyle ne l'utilise pas une seule autre fois entre 1950 et 1965, alors même qu'il écrit beaucoup pour critiquer les modèles d'univers avec origine dans le temps.

Contrairement à ce que l'on entend également souvent, cette expression n'a pas d'impact immédiat. Elle est notamment peu reprise par les astronomes et physiciens. Ce n'est qu'au milieu des années 1960 qu'elle devient, tant auprès des spécialistes que du grand public, l'expression usuelle

pour désigner les modèles d'univers ayant une origine dans le temps ou passant par une phase très dense et très chaude. Jusqu'à cette époque, les connaisseurs se partageaient entre ceux qui doutaient de la scientificité de la cosmologie, ceux qui hésitaient entre un modèle avec origine dans le temps ou un modèle sans origine, et ceux qui avaient une préférence nette pour l'un ou l'autre type de modèle. L'expression « big bang », inventée près de quinze années plus tôt, s'impose finalement en même temps que le modèle qu'elle désigne<sup>4</sup>. Depuis le début des années 1970, ce modèle d'univers est de fait accepté par la quasi-totalité des astrophysiciens. C'est l'histoire de cette consécration dont il sera question dans ce chapitre.

## PREMIÈRES ÉBAUCHES COSMOLOGIQUES

### *La cosmologie au XIX<sup>e</sup> siècle*

Au XIX<sup>e</sup> siècle, les astronomes ne pratiquent pas vraiment la cosmologie, c'est-à-dire qu'ils s'intéressent peu à l'univers pris comme un tout. Leur regard se porte essentiellement sur le Système solaire, les étoiles, la Voie lactée. Cette dernière est visible comme une bande laiteuse qui traverse le ciel. Dès l'usage des premières lunettes modernes, cette zone du ciel révèle qu'elle est en réalité composée de milliers d'étoiles qui constituent un vaste disque vu par la tranche. Ce

disque d'étoiles constitue notre « galaxie », du grec *galaktos* qui signifie « laiteux ». En dehors de la Voie lactée, les astronomes découvrent aussi des nébuleuses, sorte de nuages lumineux. Ces objets sont-ils situés à l'extérieur ou à l'intérieur de notre Galaxie ? À l'époque, la thèse dominante est qu'ils se situent à l'intérieur. L'affaire semble suffisamment réglée pour que, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'astronome anglaise Agnes Clerke déclare de façon péremptoire qu'aucun « penseur compétent [...] ne peut de nos jours [...] soutenir qu'une seule nébuleuse est un système d'étoiles équivalent à la Voie lactée<sup>5</sup> ». Pour beaucoup d'astronomes, l'univers matériel se résume donc à notre seule Galaxie, la Voie lactée. Cette galaxie n'est toutefois pas le tout de l'univers puisqu'elle est supposée être plongée au sein d'un espace infini. Mais la nature exacte de cet espace est laissée à la spéculation. Aussi, pour la grande majorité des astronomes, la réflexion sur l'univers pris comme un tout relève-t-elle plus de la philosophie que de l'activité scientifique.

Malgré ce contexte, l'idée que l'univers a une origine dans le temps apparaît. D'où vient-elle ? Si on laisse de côté les mythes anciens qui ont élaboré certains récits de la création du monde, les premières conceptions relevant de la physique moderne datent du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. Par exemple, en 1858, l'astronome allemand Johann von Mädler cherche à expliquer le fameux paradoxe d'Olbers du « ciel noir » : l'apparente contradiction d'un ciel majoritairement noir alors que, dans un univers infini, uniformément peuplé d'étoiles, la brillance cumulée de tous ces astres devrait rendre

la voûte céleste lumineuse. Selon lui, ce paradoxe pourrait être résolu en supposant que « le monde est créé et n'est donc pas éternel<sup>6</sup> ». Son argument est que, si les étoiles n'ont existé que pendant une période limitée, la lumière de celles qui sont très lointaines n'a pas encore atteint la Terre. Ce qui expliquerait que, la nuit, le ciel soit noir.

Une autre conception d'un commencement de l'univers émerge également avec le développement de la thermodynamique, c'est-à-dire la science des processus et échanges thermiques qui est basée sur trois grands principes. En 1850 précisément, le deuxième de ces principes de la thermodynamique est défini pour la première fois. Il explicite la tendance naturelle de la température à s'égaliser. Par exemple, un verre d'eau froide placé au milieu d'une pièce va finir par avoir la même température que l'air ambiant. En 1865, ce principe est reformulé en utilisant le concept d'entropie, qui caractérise le degré de désordre d'un système. Ce deuxième principe stipule ainsi que l'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter avec le temps jusqu'à atteindre une valeur maximale où le système reste en équilibre. C'est une traduction précise de la constatation simple que tout système physique laissé à lui-même tend à se désorganiser jusqu'à atteindre un niveau de désorganisation maximale. Ainsi, un morceau de glace dans un verre d'eau tend à fondre jusqu'à ne plus se distinguer du reste de l'eau.

Une fois ce principe formulé, il est tentant de l'appliquer à l'univers<sup>7</sup>. Si on considère ce dernier comme un système isolé, il faut en conclure

que son entropie ne peut que croître. Et donc, s'il avait un passé infini, il aurait déjà atteint son état d'entropie maximale et serait devenu inerte. Comme ce n'est manifestement pas le cas, il faut en conclure que l'univers a un âge fini. En suivant ce petit raisonnement, certains physiciens en arrivent à supposer que l'univers est apparu, ou a été créé, à un moment donné. C'est ainsi que naît, dès le XIX<sup>e</sup> siècle dans le cadre d'une théorie physique, l'idée que l'univers a un âge fini. Par exemple, James Clerk Maxwell, le « père » de l'électromagnétisme, écrit en 1870 en faisant explicitement référence au deuxième principe de la thermodynamique, que, si nous retraçons l'histoire de l'univers en remontant dans le temps,

[n]ous arrivons à la conception d'un état de choses qui ne peut pas être conçu comme le résultat d'un état antérieur, et nous constatons que cette situation critique a réellement existé à une époque qui ne remonte pas dans les profondeurs de l'éternité passée, mais est séparée du temps présent par un intervalle fini. Cette idée de commencement [de l'univers] est une idée que les recherches physiques de l'époque récente [en thermodynamique] nous ont apportée, plus qu'aucun observateur de l'évolution de la pensée scientifique ne pouvait l'espérer<sup>8</sup>.

Mais cette idée de commencement reste discutable. Peut-on réellement considérer l'univers comme un système isolé ? Isolé de quoi ? Certains, considérant que le deuxième principe ne

s'applique pas à l'univers pris comme une totalité, en concluent que la physique n'a rien à dire sur un éventuel âge de l'univers. Ont-ils raison ? Difficile à dire. Personne n'arrive à formuler d'argument convaincant pour savoir si la thermodynamique s'applique ou non à l'univers. Dans tous les cas, l'idée reste vague et elle est peu reprise. Impossible de dater l'origine de l'univers, par exemple, ou d'appréhender son évolution. Il n'y a donc pas encore de cosmologie, c'est-à-dire d'étude de l'univers dans sa globalité, et encore moins de cosmogonie moderne, c'est-à-dire d'étude de la naissance de l'univers.

Néanmoins, le développement d'une nouvelle géométrie, dite « non euclidienne » (où, par exemple, deux droites parallèles peuvent se couper), allait inciter certains chercheurs à repenser l'univers dans sa totalité, en fonction de sa géométrie. Dans les années 1870, en supposant que la quantité de matière est finie, l'astrophysicien Karl Friedrich Zöllner fait ainsi remarquer que si l'univers est infini, la matière devrait s'éparpiller petit à petit et la densité tendre vers zéro. Comme ce n'est manifestement pas encore le cas, Zöllner en conclut que soit l'espace est fini, soit l'univers a une durée d'existence finie. Cette dernière conclusion n'ayant pas sa faveur, il en vient à suggérer que l'univers est fini, c'est-à-dire fermé sur lui-même comme permet de le penser la géométrie sphérique (non euclidienne). Cette conception passe toutefois relativement inaperçue dans les milieux scientifiques de l'époque qui continuent à penser que le concept d'univers représente un

espace vaguement immuable dans lequel sont plongés les astres<sup>9</sup>.

### *Les débuts de la cosmologie relativiste*

La situation va globalement rester en l'état jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle. Le changement est amorcé par Albert Einstein qui, en 1915, élabore la théorie de la relativité générale. Cette théorie, pour faire simple, revient à donner une interprétation géométrique de la gravitation. Elle introduit une interaction entre le contenu et le contenant, ou entre la matière et l'espace-temps qui la contient. Cet espace-temps, où le temps n'est pas indépendant de l'espace, n'est plus inerte et rigide, mais réagit à la présence de matière en se courbant à la manière d'une toile élastique sur laquelle on dépose une lourde bille. La théorie prédit ainsi que, localement, l'espace se courbe en présence d'objets massifs. En 1917, Einstein décide d'appliquer cette idée au cosmos pris comme un tout. Les équations de la nouvelle gravitation étant d'une extrême complexité, pour les résoudre, il est obligé de faire des hypothèses très simplificatrices. Il doit supposer par exemple que l'univers est homogène et isotrope, c'est-à-dire qu'il apparaît identique en tout point et dans toutes les directions. La pertinence de cette hypothèse, qui sera appelée « principe cosmologique » par la suite, est difficile à évaluer dans les années 1920. L'univers n'est manifestement pas homogène et isotrope, au sens où il n'est pas partout pareil. Mais on peut supposer qu'en prenant un volume d'univers

suffisamment grand, il pourrait « en moyenne » être considéré comme tel. La question est de savoir si cette hypothèse peut être prise comme une bonne approximation de l'univers quand on veut l'étudier dans sa globalité. En tout cas, elle permet à Einstein de résoudre les équations auxquelles il arrive. C'est la raison pour laquelle il se sent contraint de l'adopter<sup>10</sup>.

Avec ses équations et cette hypothèse, Einstein aboutit à une solution qui le rend perplexe : l'univers n'est pas en équilibre car la structure de l'espace évolue avec le temps ; plus exactement, son univers a tendance à s'effondrer sur lui-même sous l'effet de sa propre gravité. Phénomène qui n'est suggéré ni par les données astronomiques de l'époque ni par les considérations thermodynamiques du XIX<sup>e</sup> siècle. Pour remédier à ce résultat qui pose problème, Einstein ajoute à ses solutions un paramètre supplémentaire, une constante arbitraire, désignée par la lettre grecque  $\Lambda$  (*Lambda*), représentant une propriété d'expansion de l'espace-temps qui a pour effet de contrebalancer l'action de la gravité. Sa valeur doit bien sûr être très faible pour n'avoir d'incidence qu'au niveau cosmologique et pas planétaire, par exemple. Elle sera appelée par la suite « constante cosmologique ». Voici donc Einstein en possession d'une description mathématique d'un univers statique et fini.

Ce n'est toutefois pas la seule solution possible de ses équations. En découvrant ce modèle cosmologique d'Einstein, le physicien néerlandais Willem de Sitter les reprend et montre, dès 1917,

Jean-Marc Bonnet-Bidaud

Thomas Lepeltier

# Big bang

**Histoire critique d'une idée**

La cosmologie est aujourd'hui à la croisée des chemins. Le modèle du big bang, qui est censé décrire l'histoire de notre univers, s'est imposé à la communauté scientifique au milieu des années 1960. Depuis lors, il semble un horizon indépassable. Pourtant, ces dernières années, il a été confronté à des difficultés croissantes. Quelle est la source de l'expansion ? Comment expliquer la phase d'inflation ? Où est passée l'antimatière ? Pourquoi doit-on supposer l'existence de matière noire et d'énergie noire de nature inconnue ? Sans réponse à ces questions, le modèle du big bang reste fragile.

Ce livre raconte comment s'est construite l'idée du big bang et décrit les modifications majeures qu'elle a subies pour rester en accord avec les observations du ciel. Il évoque autant les coups de génie qui ont procédé à son élaboration que ses limites souvent passées sous silence. À l'opposé du consensus habituellement exposé, cet ouvrage dévoile aussi combien sont vifs les débats entre cosmologistes sur la validité de ce modèle d'univers. Par cette approche critique, les auteurs soulignent que notre vision du cosmos pourrait bien être à l'aube d'une révolution majeure.



## **Big bang**

Jean-Marc Bonnet-Bidaud  
Thomas Lepeltier

Cette édition électronique du livre  
*Big bang* de Jean-Marc Bonnet-Bidaud et Thomas Lepeltier  
a été réalisée le 20 août 2021 par les Éditions Gallimard.

Elle repose sur l'édition papier du même ouvrage  
(ISBN : 9782070463916 - Numéro d'édition : 278445).

Code Sodis : N69640 - ISBN : 9782072586491.

Numéro d'édition : 278446.