

FORME ET ORIGINE DE L'UNIVERS

Regards philosophiques sur la cosmologie

Sous la direction d'Aurélien Barrau et de Daniel Parrochia

*Julien Lescourges, Jean-Pierre Luminet, Sylvie Vauclair,
François Vannucci, Philippe Brax, Michel Cassé,
Marc Lachièze-Rey, Pierre Vanhove, Julien Grain,
Guillaume Duprat, Luc Brisson, Jean Seidengart,
Nicolas Prantzos, Daniel Parrochia, Christian Godin,
Étienne Klein, Jean-Jacques Szczéciniaż, Gérard Chazal,
Michel Paty, Aurélien Barrau*

DUNOD

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autori-

sation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2010
ISBN 978-2-10-056044-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^e et 3^e al, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Introduction	I
Partie I : Le modèle standard de la cosmologie physique	
Chapitre 1 : État de l'art en cosmologie physique	9
Chapitre 2 : Les inventeurs du Big-bang	25
Chapitre 3 : L'Homme à la recherche de nouveaux mondes	45
Chapitre 4 : L'infiniment petit et les limites de la connaissance	55
Partie 2 : Cosmologie et recherche de « nouvelle physique »	
Chapitre 5 : La cosmologie : un laboratoire de l'infiniment petit	69
Chapitre 6 : Métacosmologie	87
Chapitre 7 : Vers la cosmologie quantique	105
Chapitre 8 : La cosmologie : un laboratoire pour la théorie des cordes	125
Chapitre 9 : Des univers multiples ?	141
Partie 3 : Éléments d'histoire de la cosmologie et des épistémologies	
Chapitre 10 : Forme et structure de l'univers dans les civilisations anciennes et les traditions orales	163
Chapitre 11 : Platon et la cosmologie	179

Chapitre 12 : L'« influence » de T. Wright of Durham sur la cosmologie précritique de Kant	197
Chapitre 13 : Cosmologie et matérialisme dialectique	219
Chapitre 14 : Gaston Bachelard et la cosmologie	235
 Partie 4 : Philosophie de la cosmologie contemporaine	
Chapitre 15 : Criticisme et positivisme : la déraisonnable prudence des philosophes en matière de cosmologie	249
Chapitre 16 : Un discours sur l'origine est-il possible ?	267
Chapitre 17 : La cosmologie comme science spéculative ou comme théorie philosophique scientifique	283
Chapitre 18 : Cosmologie et scientificité	309
Chapitre 19 : Sur le caractère physique du concept de temps de la cosmologie	327
Chapitre 20 : La cosmologie comme « manière de faire un monde » – Physique, relativisme et irréalisme –	353
Notes	381

Les auteurs

Partie I : Le modèle standard de la cosmologie physique

Chapitre 1 : État de l'art en cosmologie physique

Julien Lesgourgues. Cosmologiste, chercheur au CERN et au CNRS, professeur à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Chapitre 2 : Les inventeurs du Big-bang

Jean-Pierre Luminet. Astrophysicien, directeur de recherches CNRS au Laboratoire Univers et Théories, Observatoire de Paris.

Chapitre 3 : L'Homme à la recherche de nouveaux mondes

Sylvie Vauclair. Astrophysicienne, professeur à l'Université de Toulouse, chercheur au Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire Midi-Pyrénées, membre de l'Institut universitaire de France.

Chapitre 4 : L'infiniment petit et les limites de la connaissance

François Vannucci. Physicien des particules, professeur à l'Université Denis Diderot, chercheur au laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies de Paris et au laboratoire Astroparticule et Cosmologie.

Partie 2 : Cosmologie et recherche de « nouvelle physique »

Chapitre 5 : La cosmologie : un laboratoire de l'infiniment petit

Philippe Brax. Physicien théoricien, directeur de recherche à l'institut de physique théorique du CEA à Saclay.

Chapitre 6 : Métacosmologie

Michel Cassé. Astrophysicien, directeur de recherches au CEA et chercheur invité à l'Institut d'Astrophysique de Paris.

Chapitre 7 : Vers la cosmologie quantique

Marc Lachièze-Rey. Cosmologiste, directeur de recherches CNRS au laboratoire Astroparticule et Cosmologie.

Chapitre 8 : La cosmologie : un laboratoire pour la théorie des cordes

Pierre Vanhove. Physicien théoricien, ingénieur CEA, chercheur à l'Institut de Physique Théorique du CEA-Saclay et à l'Institut des Hautes Études Scientifiques (IHÉS).

Chapitre 9 : Des univers multiples ?

Julien Grain. Cosmologiste, chercheur CNRS à l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay.

Partie 3 : Éléments d'histoire de la cosmologie et de ses épistémologies

Chapitre 10 : Forme et structure de l'univers dans les civilisations anciennes et les traditions orales

Guillaume Duprat. Cosmographe, chercheur indépendant.

Chapitre 11 : Platon et la cosmologie

Luc Brisson. Philosophe, directeur de recherche au CNRS.

Chapitre 12 : L'« influence » de T. Wright of Durham sur la cosmologie précritique de Kant

Jean Seidengart. Philosophe, professeur à l'Université Paris-Ouest Nanterre-La Défense.

Chapitre 13 : Cosmologie et matérialisme dialectique

Nicolas Prantzos. Astrophysicien, directeur de recherches CNRS à l'Institut d'Astrophysique de Paris.

Chapitre 14 : Gaston Bachelard et la cosmologie

Daniel Parrochia. Philosophe, professeur de logique et philosophie des sciences à l'Université Jean Moulin-Lyon III.

Partie 4 : Philosophie de la cosmologie contemporaine

Chapitre 15 : Criticisme et positivisme : la déraisonnable prudence des philosophes en matière de cosmologie

Christian Godin. Philosophe, maître de conférences à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand.

Chapitre 16 : Un discours sur l'origine est-il possible ?

Étienne Klein. Physicien, philosophe, directeur de recherches au CEA.

Chapitre 17 : La cosmologie comme science spéculative ou comme théorie philosophique scientifique

Jean-Jacques Szczéciniaarz. Philosophe, mathématicien, professeur à l'Université Paris-Diderot.

Chapitre 18 : Cosmologie et scientificité

Gérard Chazal. Philosophe, professeur émérite à l'Université de Bourgogne.

Chapitre 19 : Sur le caractère physique du concept de temps de la cosmologie

Michel Paty. Physicien, philosophe, directeur de recherche émérite au CNRS

Chapitre 20 : La cosmologie physique comme « manière de faire un monde » - Physique, relativisme et irréalisme

Aurélien Barrau. Astrophysicien, maître de conférences IUF à l'Université Joseph Fourier, chercheur au Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble.

Introduction

Daniel Parrochia et Aurélien Barrau

La cosmologie physique, sous la forme mathématique qu'elle a prise à partir du début du XX^e siècle, est, quelle que soit la manière dont on l'aborde, une science très formalisée, et traversée, au surplus, de nombreux débats théoriques – incluant souvent des disciplines connexes d'abord difficile (par exemple, la physique quantique) – où le non-spécialiste peut ne pas parvenir aisément à se frayer un chemin. D'où, très souvent également, un certain scepticisme perceptible à l'égard de cette discipline, par ailleurs fascinante à tous égards puisqu'elle pose des questions aussi essentielles que celle de l'origine de l'univers observable, de ses dimensions (finies ou infinies¹), de son évolution et, le cas échéant, de sa fin. Il nous a semblé que ces questions, qu'on retrouve dans toutes les cultures et qui, après avoir nourri la spéculation des penseurs présocratiques dans la nôtre, ont pu émerger à nouveau au début du siècle dernier, méritaient d'être débattues conjointement entre scientifiques et philosophes, dans la mesure où elles n'engageaient pas seulement des réponses physiques, mais se trouvaient aussi, parfois, devoir être déjà préalablement analysées et étudiées en tant que questions, c'est-à-dire d'abord bien précisées dans leurs termes au sein de la langue naturelle, avant de donner éventuellement lieu à des réponses scientifiques. De ce point de vue, les exposés d'E. Klein (sur la notion d'origine) et de M. Paty (sur le concept de temps physique) sont ici des modèles du genre.

Il faut de plus reconnaître que la philosophie, tout comme la science elle-même, a évolué, au fil de l'histoire, dans sa façon d'aborder ces questions cruciales.

La philosophie classique, qu'on peut définir de façon rapide comme une pensée dans la perspective d'une totalité, incluait autrefois nécessairement dans ses développements une réflexion sur le monde, plus encore que sur l'univers². Elle était ou, du moins, se voulait être, en ce sens, une véritable cosmologie. Il y avait là sans doute un héritage des premières spéculations mythologiques, telle que G. Duprat nous les présente dans leur diversité, et qui sont elles-mêmes des façons plus ou moins significatives de s'emparer du réel et de tenter de le maîtriser.

Saisir des « mondes entiers » est cependant toujours apparu aux penseurs les plus rationnels comme parfaitement présomptueux. Platon se méfiait déjà de la cosmologie présocratique, et même s'il a cédé, dans le *Timée*, à la tentation d'expliquer la totalité du réel, du moins l'a-t-il fait – comme le montre bien L. Brisson, grand connaisseur de ce dialogue – en tentant surtout de dégager des principes rationnels. Kant, on le sait, malgré ses premières amours pour les théories du ciel du XVIII^e siècle (voir l'exposé savant de J. Seidengart) – a cru, dans la période critique, pouvoir démontrer (Ch. Godin le rappelle avec compétence) le caractère aporétique de certaines interrogations sur l'origine. Un peu plus tard, Comte refusait aux spéculations astronomiques tout intérêt et toute utilité, et loin encore dans le XX^e siècle, Bachelard, « philosophe sans monde » selon ses propres dires, doutait lui-même que la pensée à moitié artificielle et à moitié rêveuse de l'univers que développaient les physiciens de son temps, ait la moindre pertinence réelle (voir l'exposé de D. Parrochia). Il faudra, comme le montre G. Chazal dans la dernière partie de son exposé, le retour d'une saine dialectique de la théorie et de l'expérience (« dialectique » à vrai dire présente dans le développement même de la pensée physique tout

entière selon N. Prantzos) pour que la cosmologie intègre ou réintègre le champ des connaissances positives et soit enfin admise, par les philosophes eux-mêmes, comme une science à part entière.

On comprendra mieux les raisons de ces réticences si l'on se réfère à la façon dont la physique, historiquement parlant, s'est développée. L'avènement d'une science mathématisée en effet, devait, peu à peu, supplanter – au moins vis-à-vis de certaines attentes – les premières spéculations cosmogoniques. À partir du début du XVII^e siècle et pendant près de deux siècles, disons de Galilée à Newton, la physique « moderne » s'est pratiquement passée de cosmologie. Comme l'a bien montré Jacques Merleau-Ponty, c'est seulement dans le dernier quart du XVIII^e siècle, avec le développement presque simultané des recherches de Laplace et Herschel, que s'ouvre l'ère moderne de la cosmologie³. À nouveau l'univers redevient alors une question pour les philosophes, et bientôt, des hommes comme Whewell et Cournot, bien que souvent prisonniers de considérations épistémologiques, éthiques ou théologiques, ne manqueront pas, cependant, de faire renaître la question cosmologique, quitte à lui donner des réponses diverses, allant de l'exclusion pure et simple à l'inclusion dans d'autres formes de savoir, y compris ontologiques.

Mais la grande renaissance de la cosmologie, tout le monde le sait, ne vint qu'au XX^e siècle, sous la double poussée de la science et de la technique. Là, à quelques années d'intervalle, selon le raccourci lumineux de Jacques Merleau-Ponty, « un physicien de génie et un télescope gigantesque, manié par un astronome à sa mesure, apportèrent à la Philosophie de la Nature, l'un une idée, l'autre une vision de l'Univers dont on ne sait laquelle était plus surprenante et plus exaltante »⁴. Plus d'un siècle a passé depuis cette découverte qui scella la Théorie de la Relativité Générale d'Einstein et la loi de récession des galaxies issue de l'astronomie

d'observation de Hubble, ouvrant la voie à la cosmologie moderne et à ses multiples univers « brevetés d'ingénieur » dont se moquait – un peu trop facilement sans doute – la philosophie bachelardienne.

Plus d'un siècle a passé, en effet, depuis cette époque des pères fondateurs (Einstein, De Sitter, Schwarzschild, Lemaître, Eddington, Gamow...) et de leurs découvertes majeures (identification de la gravitation et de la courbure de l'espace, univers à quatre dimensions, trous noirs, univers en expansion, rayonnement cosmologique...), et la question se pose aujourd'hui de savoir si la cosmologie contemporaine – au-delà de ces résultats incontestables – apporte bien la contribution à cette arlésienne nommée « Philosophie de la Nature » qu'attendait encore Jacques Merleau-Ponty et que certains semblent toujours appeler de leurs vœux. Certes, la théorie de la relativité générale, alliée à l'astronomie d'observation a permis l'émergence d'un nouveau paradigme – la célèbre théorie dite du « Big Bang » au sein duquel l'Univers a pu commencer d'être pensé et décrit de façon à peu près cohérente depuis ses premiers instants jusqu'à la dynamique contemporaine. Associée à la mécanique quantique, et conjointement liée à des observations de plus en plus précises et diversifiées, cette théorie a même permis, après les travaux de Andrei Linde⁵, notamment, l'avènement d'un modèle cosmologique standard plus évolué, dit du « Big-bang inflationnaire ». Dans ce cadre, l'âge de l'Univers, sa densité et plusieurs paramètres fondamentaux pour sa description sont aujourd'hui connus avec une excellente précision dont témoigne l'existence même de manuels massifs⁶ : la science du cosmos est entrée dans son ère quantitative.

Corrélativement, et suite aux premiers travaux d'Hubert Reeves⁷, nombre d'ouvrages de vulgarisation ont peu à peu familiarisé l'homme contemporain avec la cosmologie scientifique du XX^e siècle, au point de lui faire croire qu'on savait tout (ou

presque) sur l'univers : ses premières minutes d'existence⁸, voire sa première seconde⁹, sa naissance¹⁰, son histoire¹¹, ses couleurs¹², ses clairs-obscur¹³, ses trous noirs¹⁴, la nature de l'espace et du temps qui le constituent¹⁵, etc. À peine hésite-t-on parfois encore : l'univers est-il fini ou infini ? Est-il unique ou fait d'une réplique de mondes sans fin¹⁶ ? A-t-il seulement, en réalité, une forme¹⁷ ? Et si oui, celle-ci est-elle lisse ou chiffonnée¹⁸ ? Toutes ces interrogations témoignent évidemment des progrès incontestables des études cosmologiques dans les trente dernières années et de l'intérêt qu'ils suscitent, en général, dans le public.

En contrepoint de ces succès, non seulement différents problèmes continuent cependant de se poser au sein même de la science existante, mais le sens même de certaines questions mérite en fait d'être discuté philosophiquement avant toute autre investigation plus approfondie (voir les exposés d'E. Klein et de J.-J. Szczécinarz). Bien sûr des incomplétudes et des incohérences subsistent dans la démarche de cette discipline. L'essentiel du contenu de l'Univers – énergie noire et matière « sombre », comme on dit aujourd'hui¹⁹ – est de nature strictement inconnue et résiste à toute tentative de détection ou de caractérisation directe. De même, la description des temps les plus reculés nécessite le recours à une théorie quantique de la gravitation qui fait actuellement défaut dans une forme consensuelle. Enfin, l'unicité de l'Univers est elle-même remise en question par l'hypothèse controversée d'une structure de « multivers » qui imposerait, comme le suggère A. Barrau, une déconstruction profonde de notre conception de la physique. On observera également que le Cosmos est simultanément objet d'étude et laboratoire privilégié : il requiert un modèle de physique des hautes énergies et de gravitation pour être décrit mais permet également de sonder et de tester ces théories fondamentales. Cette richesse est aussi une tension qui rend l'étude particulièrement sensible

aux hypothèses sous-jacentes et aux présupposés souvent passés sous silence.

Plus que jamais, par conséquent, un questionnement philosophique sur les cent années écoulées depuis la naissance de la cosmologie moderne mérite d'être dressé. Il s'agirait d'une enquête philosophique portant notamment sur la question de savoir si les interrogations cosmologiques demeurent ou non (comme Kant, mais aussi Bachelard le pensaient) aporétiques, d'une enquête épistémologique sur les méthodes qui ont permis le développement de cette discipline et en marquent la spécificité, ainsi que sur les connaissances dont nous disposons aujourd'hui et sur ce qu'elles permettent ou non d'inférer philosophiquement concernant le « destin » de l'univers²⁰, enfin d'une enquête scientifique sur l'état de l'art observationnel et théorique. Existe-t-il, pour finir, une continuité entre le geste cosmogonique ou théogonique ancien et les modèles contemporains ? La porosité mythique de cette science si singulière qu'est la cosmologie s'est-elle définitivement évanouie ? Notre représentation du monde – si tant est que la physique *représente* une réalité qui lui soit extérieure – se trouve-t-elle à un point tournant, ouvrant vers un nouveau paradigme ?

Les exposés proprement scientifiques de ce colloque tentent de répondre, tant bien que mal, à ces questions. Ils présentent non seulement des aperçus historiques sur la théorie du « Big bang » et ses principaux « inventeurs » (J.-P. Luminet), mais un véritable panorama sur l'état actuel de la cosmologie physique (J. Lesgourgues) ainsi que des considérations plus philosophiques sur l'extension des connaissances, telles qu'elles ont été amenées par la cosmologie, aussi bien dans le domaine des mondes lointains et des nouvelles planètes (S. Vauclair²¹) que du côté de l'infiniment petit et des limites de notre savoir (F. Vanucci).

De manière encore plus détaillée, certains exposés nous feront entrer dans les secteurs les plus en pointe de la cosmologie

contemporaine, tels que l'univers primordial (Ph. Brax), la cosmologie quantique (M. Lachièze-Rey), la théorie des cordes (P. Vanhove), ou encore, le « paysage cosmique »²² des univers multiples (J. Grain), révélant, au fil de cette réflexion, combien la cosmologie ne cesse de se penser et de se réfléchir elle-même au cours de son développement, devenant au fond, comme le montre très bien M. Cassé, une « métacosmologie ».

Ce colloque, qui s'est tenu à l'Université Jean Moulin – Lyon III, devant un public de formation principalement non-scientifique a tenté de poser, sinon de résoudre, certaines des questions les plus brûlantes que l'humanité s'est jamais posée depuis qu'elle existe. Il s'est efforcé de le faire dans une langue claire, ce qui a sans doute obligé les participants scientifiques, tout en faisant appel à l'ensemble des ressources théoriques de leurs disciplines, à cependant limiter, voire éviter, les développements par trop techniques, ce dont nous les remercions grandement. Voilà qui devrait, en principe, rendre le présent ouvrage abordable pour un large public. C'est du moins le but que nous avons très sincèrement poursuivi.

Partie I : Le modèle standard de la cosmologie physique

Chapitre I État de l'art en cosmologie physique

Julien Lesgourgues

En guise d'introduction à cet ouvrage, les grands traits du modèle standard de la cosmologie physique contemporaine sont esquissés.

Il est difficile de présenter le modèle cosmologique communément adopté par les physiciens contemporains en quelques pages. On est en effet contraint de simplifier ce modèle à outrance et de survoler la liste des arguments étayant de façon plus ou moins robuste ses éléments constitutifs, au point de sembler défendre une description simpliste, irréaliste et parfois arbitraire de l'univers. C'est pourquoi on reproche souvent aux physiciens qui s'efforcent de résumer l'état actuel des connaissances en cosmologie de présenter de façon dogmatique une

vision de l'univers influencée par des partis pris théoriques. Reproche largement injustifié, car la cosmologie, comme les autres domaines de la science, procède d'un foisonnement d'hypothèses, de remises en questions et de confrontations entre théorie et observations. Pour bien apprécier la substance et la portée du modèle présenté ici, il faudrait consacrer des livres entiers à l'énumération des centaines d'alternatives qui ont été explorées, et aux innombrables rebondissements qui ont suivi chaque nouvelle observation importante. Ceci ne pouvant faire l'objet d'un chapitre, nous prions le lecteur d'accepter cette prémisses : le modèle qui sera résumé dans ces quelques pages, et que nous appellerons « modèle cosmologique standard », représente la somme des théories et des modèles *les plus simples* permettant de rendre compte de la plupart des observations actuelles. Cela ne signifie pas que ce modèle soit l'unique scénario envisageable : il en existe de plus compliqués permettant de rendre compte des observations avec autant de succès. Cela ne veut pas non plus dire que les cosmologistes s'arrêtent à ce modèle minimal et baignent dans une naïve certitude : au contraire, l'activité de la plupart d'entre nous consiste à remettre en question les conclusions qui vont suivre, à explorer des alternatives plus complexes et à vérifier dans quelle mesure ces dernières sont rendues nécessaires par de nouvelles observations. À ce jour, les quelques données expérimentales présentant un léger désaccord avec le modèle standard ne paraissent pas assez solides pour que l'on doive nécessairement recourir à de telles alternatives. Mais demain, avec des observations plus précises, une telle nécessité apparaîtra peut-être, comme c'est le cas en général dans tous les domaines scientifiques.

I. Fondements

Le modèle cosmologique standard repose en grande partie sur la théorie de la gravitation formulée par Einstein, c'est-à-dire la

relativité générale. Cette théorie, soumise à des tests expérimentaux de toutes sortes depuis presque un siècle, n'a encore jamais été prise en défaut. Pour rendre compte des interactions gravitationnelles, elle indique que la présence de matière déforme l'espace-temps, qui reçoit alors une courbure. Vu dans son ensemble, l'espace-temps décrivant notre univers est donc courbé par son propre contenu en matière.

En plus de la relativité générale, le modèle cosmologique standard repose sur un ingrédient essentiel, qui était initialement une hypothèse de travail parmi d'autres, et qui est devenu aujourd'hui un fait expérimental : à grande échelle, l'univers semble *homogène*. Des inhomogénéités telles que les galaxies et les amas de galaxies apparaissent certes aux petites échelles, mais, à des distances beaucoup plus grandes que la taille des amas de galaxies, toutes les régions de l'univers observable semblent partager les mêmes propriétés et la même densité moyenne. Ceci est attesté, d'une part, par l'observation systématique des galaxies effectuée aujourd'hui avec précision dans certaines portions du ciel jusqu'à des distances de l'ordre de quelques milliards d'années-lumière, et d'autre part, grâce à l'observation du « rayonnement de fond cosmologique » sur lequel nous reviendrons.

Dans les années 1920, Alexander Friedmann et Georges Lemaître ont construit, indépendamment l'un de l'autre, un modèle mathématique qui porte leurs noms et qui représente la seule possibilité pour décrire l'univers aux grandes échelles, à condition qu'il soit homogène et que la relativité générale soit exacte. Ce modèle prédit : premièrement, que l'espace tridimensionnel dans lequel nous vivons doit se contracter ou se dilater au fil du temps (univers en contraction ou en expansion) de façon identique en tout point ; et deuxièmement, qu'il possède une géométrie soit euclidienne, soit elliptique, soit hyperbolique. Ces trois propriétés ont des définitions mathématiques précises mais sont délicates à représenter. Pour résumer, un

espace euclidien est un espace infini de courbure nulle, conforme à notre intuition commune, dans lequel l'axiome d'Euclide est valide et la somme des angles d'un triangle est égale à 180 degrés. En revanche, lorsque la géométrie est elliptique, l'espace est courbe et de volume fini, une droite finit toujours par se recouper et la somme des angles d'un triangle quelconque excède 180 degrés (un tel espace est parfois appelé « fermé »). Lorsque la géométrie est hyperbolique, l'espace est infini mais toujours courbe et la somme des angles est cette fois inférieure à 180 degrés (cet espace est appelé aussi « ouvert »).

De plus, dans le modèle de Friedmann-Lemaître, les deux questions de l'évolution de l'univers (contraction ou expansion) et de sa géométrie (euclidienne, elliptique ou hyperbolique) sont intimement liées à celle de son contenu : de l'abondance de telle ou telle « espèce » dépend l'appartenance à l'un des cas de figure décrits ci-dessus. Ces « espèces » pourraient être, *a priori* : de la matière ordinaire (les atomes constituant les planètes, les étoiles, la partie visible des galaxies) ; du rayonnement (par exemple, un rayonnement électromagnétique diffus, décrit par la mécanique quantique comme un bain de particules de masses nulles appelées photons) ; éventuellement, des particules plus exotiques non découvertes jusqu'à ce jour en laboratoire ; ou bien un fluide ou une entité plus mystérieuse encore, comme la fameuse « constante cosmologique » proposée par Einstein, et qui équivaut mathématiquement à un fluide de pression négative...

Les premiers physiciens ayant tenté d'appliquer concrètement le modèle de Friedmann-Lemaître à la description de notre univers n'avaient à leur disposition que deux indices : premièrement, la mise en évidence par Edwin Hubble de l'expansion de l'univers grâce à l'effet Doppler, toujours dans les années 1920 ; deuxièmement, le fait que l'on observe tout autour de nous de la matière ordinaire formant des étoiles et des galaxies. Pour une description moyenne de l'univers aux grandes échelles, ces deux

indices sont compatibles avec un modèle de Friedmann-Lemaître contenant uniquement – ou du moins majoritairement – de la matière ordinaire : c'est l'hypothèse la plus simple qui pouvait être formulée au milieu du XX^e siècle. Ce modèle est appelé « univers dominé par la matière ». Dans ce cas de figure, l'expansion de l'univers doit être nécessairement décélérée : la matière s'y dilue, mais de plus en plus lentement. Ce modèle prédit également que notre univers devait être initialement presque homogène, avec néanmoins d'infimes irrégularités. Aux lieux contenant initialement de légères surdensités, la matière s'est accumulée sous l'effet des forces de gravitation, de manière à former, au bout de quelques milliards d'années, les galaxies et amas de galaxies que nous observons aujourd'hui (Isaac Newton avait déjà eu l'intuition d'un tel processus). L'univers primordial n'était donc pas constitué de galaxies séparées par du vide, mais plutôt d'une soupe de particules élémentaires quasiment homogène. Sous l'effet de l'expansion, cette soupe primordiale s'est diluée et refroidie au fil du temps, et s'est ensuite fragmentée pour former des galaxies distinctes.

Ce modèle d'« univers dominé par la matière » est un cas particulier de « modèle de Big-bang » dans la mesure où, si l'on extrapole vers le passé, on aboutit à un instant critique correspondant à une densité de matière infinie. Ceci ne veut pas dire que cet instant ait été effectivement atteint. En effet, les lois physiques sur lesquelles ce modèle repose pourraient perdre leur validité à très haute énergie avant d'atteindre une telle singularité – et même, elles doivent perdre leur validité à un certain point, selon des arguments bien connus exposés dans les chapitres suivants de cet ouvrage. On ne peut actuellement rien dire sur ce qui aurait pu se passer avant ce point, et il est totalement artificiel d'extrapoler un modèle cosmologique jusqu'à un instant initial où la densité de matière serait infinie. Il faut donc souligner qu'un physicien travaillant dans le cadre d'un « modèle

de Big-bang » n'effectue pas l'hypothèse que l'univers trouve son « origine » dans une quelconque singularité ou « explosion initiale », contrairement à une idée fort répandue. Le terme « Big-bang » décrit une propriété asymptotique de certains modèles cosmologiques, qui ne sont pris au sérieux qu'à partir d'un instant initial correspondant à une densité de matière certes très élevée, mais finie.

L'observation de la dynamique des corps célestes (vitesse des galaxies dans les amas de galaxies, vitesse des étoiles dans les galaxies) a conduit les astrophysiciens – à commencer par Fritz Zwicky en 1933 – à effectuer une distinction entre deux types de matière : d'une part, la matière lumineuse et d'autre part, la « matière sombre » ou « matière noire », que l'on ne peut localiser qu'indirectement, et ce grâce à l'attraction gravitationnelle qu'elle exerce. Cette hypothèse, largement confirmée depuis lors, intrigue fort les physiciens des particules qui déploient d'intenses efforts pour comprendre la nature de cette matière sombre – probablement une particule exotique aux propriétés radicalement différente des particules usuelles et qui pourrait même, avec de la chance, être créée et étudiée dans les années à venir au sein de l'accélérateur de particules du CERN à Genève. Le modèle d'« univers dominé par la matière » doit être compris comme un modèle de Friedmann-Lemaître contenant à la fois de la matière lumineuse et de la matière sombre.

2. Une brève histoire cosmique

À des instants très reculés, et donc à des températures très élevées, la soupe de particules primordiale était parcourue de réactions nucléaires empêchant la formation des noyaux des atomes. En dessous d'une certaine température critique, ces réactions devinrent impossibles faute d'énergie, et les noyaux des atomes se formèrent. La proportion entre différents types de noyaux